

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SEMENTES



Dissertação

**SECAGEM ESTACIONÁRIA COM AR EM BAIXAS TEMPERATURAS E
DESUMIDIFICADO POR REFRIGERAÇÃO.**

GLADIMIR PINTO DA SILVA

PELOTAS
Rio Grande do Sul – Brasil
2014

GLADIMIR PINTO DA SILVA

**SECAGEM ESTACIONÁRIA COM AR EM BAIXAS TEMPERATURAS E
DESUMIDIFICADO POR REFRIGERAÇÃO.**

Dissertação apresentada a Faculdade de
Agronomia Eliseu Maciel, Universidade
Federal de Pelotas, sob orientação do
professor Dr. Orlando Antônio Lucca
Filho, para obtenção do título de Mestre
em Ciência e Tecnologia de Sementes.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Antônio Lucca Filho
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Silveira da Luz

PELOTAS
Rio Grande do Sul – Brasil
2014

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S111s Silva, Gladimir Pinto da

Secagem estacionária com ar em baixas temperaturas e desumidificado por refrigeração / Gladimir Pinto da Silva ; Orlando Antônio Lucca Filho, orientador. — Pelotas, 2014.

56 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

1. Secagem estacionária. 2. Ar desumidificado. 3. Secagem de sementes. I. Lucca Filho, Orlando Antônio, orient. II. Título.

CDD : 631.521

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

GLADIMIR PINTO DA SILVA

**SECAGEM ESTACIONÁRIA COM AR EM BAIXAS TEMPERATURAS E
DESUMIDIFICADO POR REFRIGERAÇÃO.**

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO:

Orientador: Prof. Dr. Orlando Antônio Lucca Filho

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Silveira da Luz

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Orlando Antônio Lucca Filho

Prof. Dr. Carlos Alberto Silveira da Luz

Prof.^a. Dra. Maria Laura Gomes Silva da Luz

Prof. Dr. Wilner Brod Peres

DEDICATÓRIAS

A Deus que me deu forças, abriu portas e colocou em meu caminho inúmeros amigos, professores e colegas de mestrado, que no decorrer dessa jornada foram verdadeiros anjos da guarda me ajudando e orientando.

A meus pais Agostinho e Maria Lúcia que, não tendo a oportunidade de estudar, sempre lutaram para que os filhos trilhassem o caminho do saber.

A minha esposa Ana Alice, pela compreensão e apoio nos momentos em que achei a jornada pesada demais.

A meus filhos Mariana e Rodrigo que são, sempre, motivos de muito orgulho para mim.

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador e agora amigo, Orlando Antônio Lucca Filho, pela orientação na realização deste mestrado.

Ao amigo, professor e coorientador Carlos Alberto Silveira da Luz pela incansável dedicação no auxílio deste trabalho.

À professora Maria Laura Gomes Silva da Luz pelo precioso auxílio, prestado neste trabalho.

Aos amigos Rafael Galli, colega de trabalho e de mestrado, e Igor Rocha Barros, colega de graduação e de trabalho, pelo desenvolvimento do sistema eletrônico de aquisição de dados.

Ao aluno de eletrônica do campus Pelotas do Instituto Federal Sul-rio-grandense de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSul), André Wille Lemke, que desenvolveu o software de aquisição de dados.

Ao professor Francisco Amaral Villela, coordenador do curso de mestrado, professor e incentivador nesse curso, meus sinceros agradecimentos.

A todos os professores desse curso pela dedicação e competência com a qual ministraram as disciplinas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade Eliseu Maciel da UFPel, departamento no qual realizei alguns créditos para este mestrado e que muito contribuíram para meu crescimento científico.

A Maria Alice da Silva de Castro, funcionária da Faculdade Eliseu Maciel que realizou as análises de laboratório.

Aos amigos e colegas de trabalho Amilton Cravo Moraes e Henrique Carlos Hadler Tröger pelo coleguismo demonstrado nas trocas de horário que necessitei para cursar algumas disciplinas.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01 – Conjunto de silos secadores	11
Figura 02 – Interface do programa de aquisição	12
Figura 03 – Umidade do produto no secador refrigerado A – 07/04	17
Figura 04 – Umidade do produto no secador refrigerado B – 07/04	17
Figura 05 – Umidade do produto no secador refrigerado A – 28/04	17
Figura 06 – Umidade do produto no secador refrigerado C – 28/04	17
Figura 07 – Umidade do produto no secador com ar ambiente C - 07/04	18
Figura 08 – Umidade do produto no secador com ar ambiente D - 07/04	18
Figura 09 – Umidade do produto no secador com ar ambiente B - 28/04	18
Figura 10 – Umidade do produto no secador com ar ambiente D - 28/04	19
Figura 11 – Umidade relativa do ar de secagem – secador refrigerado A – 07/04	23
Figura 12 – Umidade relativa do ar de secagem – secador refrigerado B – 07/04	23
Figura 13 – Umidade relativa do ar de secagem – secador refrigerado A – 28/04	23
Figura 14 – Umidade relativa do ar de secagem – secador refrigerado C – 28/04	24
Figura 15 – Umidade relativa do ar de secagem – secador com ar ambiente C – 07/04	24
Figura 16 – Umidade relativa do ar de secagem – secador com ar ambiente D – 07/04	24
Figura 17 – Umidade relativa do ar de secagem – secador com ar ambiente B – 28/04	24
Figura 18 – Umidade relativa do ar de secagem – secador com ar ambiente D – 28/04	25
Figura 19 – Umidade relativa do ambiente nos dias do experimento	26
Figura 20 – Temperaturas do ambiente e de saída do condicionador de ar	26
Figura 21 – Temperaturas do ar de secagem – secador refrigerado A – 07/04.	27
Figura 22 – Temperaturas do ar de secagem – secador refrigerado B – 07/04.	27
Figura 23 – Temperaturas do ar de secagem – secador refrigerado A – 28/04.	27

	Página
Figura 24 – Temperaturas do ar de secagem – secador refrigerado C – 28/04	28
Figura 25 – Temperaturas do ar de secagem – secador com ar ambiente C – 07/04	28
Figura 26 – Temperaturas do ar de secagem – secador com ar ambiente D – 07/04	28
Figura 27 – Temperaturas do ar de secagem – secador com ar ambiente B – 28/04	28
Figura 28 – Temperaturas do ar de secagem – secador com ar ambiente D – 28/04	29
Figura 29 – Gráfico psicrométrico dos secadores com ar refrigerado do dia 07	30
Figura 30 – Gráfico psicrométrico dos secadores com ar refrigerado do dia 28	31
Figura 31 – Gráfico psicrométrico dos secadores com ar ambiente do dia 07 .	32
Figura 32 – Gráfico psicrométrico dos secadores com ar ambiente do dia 28 .	33
Figura 33 – Temperaturas do produto – secador refrigerado A – 07/04	34
Figura 34 – Temperaturas do produto – secador refrigerado B – 07/04	34
Figura 35 – Temperaturas do produto – secador refrigerado A – 28/04	34
Figura 36 – Temperaturas do produto – secador refrigerado C – 28/04	34
Figura 37 – Temperaturas do produto – secador com ar ambiente C – 07/04 ..	35
Figura 38 – Temperaturas do produto – secador com ar ambiente D – 07/04 ..	35
Figura 39 – Temperaturas do produto – secador com ar ambiente B – 28/04 ..	35
Figura 40 – Temperaturas do produto – secador com ar ambiente D – 28/04 ..	35
Figura 41 – Tabela de equilíbrio higroscópico do arroz	40
Figura 42 – Gráfico psicrométrico das médias de temperaturas e umidades do ar de secagem dos secadores tratados com ar refrigerado e tratados com ar ambiente	41
Figura 43 – Proposta de otimização do sistema com leve acréscimo de temperatura	42

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 01 – Temperaturas x desenvolvimento de insetos	04
Tabela 02 – Dados das amostragens do dia 07	15
Tabela 03 – Dados das amostragens do dia 28	16
Tabela 04 – Dados do sistema de aquisição do dia 07/04	20
Tabela 05 – Dados do sistema de aquisição do dia 28/04	21
Tabela 06 – Umidades das amostras finais do produto – Método de estufa a 105°C/24 horas	36
Tabela 07 – Análise de variância dos dados do medidor de umidade capacitivo	38
Tabela 08 – Teste de Tukey dos dados do medidor de umidade capacitivo	38
Tabela 09 – Análise de variância dos resultados da análise em laboratório – método de estufa a 105°C/24 horas	39
Tabela 10 – Teste de Tukey – método de estufa a 105°C/24 horas	39

SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO	01
2 – REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1 Produção de sementes de alta qualidade	03
2.2 Métodos de secagem artificial	05
2.3 Processo de aquecimento do ar de secagem	07
2.4 Desumidificação do ar por resfriamento	08
3 – MATERIAL E MÉTODOS	09
3.1 Local e material	09
3.2 Metodologia de secagem	13
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 Acompanhamento da secagem por amostragem	14
4.2 Análise gráfica da umidade do produto durante o processo	16
4.3 Aquisição de dados do processo de secagem	19
4.4 Análise gráfica das umidades relativas do ar de secagem	23
4.5 Análise gráfica das condições do ar ambiente e do ar de secagem na saída do condicionador de ar	25
4.6 Análise gráfica da temperatura do ar de secagem	27
4.7 Análise psicrométrica do ar de secagem	30
4.8 Análise gráfica da temperatura do produto durante o processo	33
4.9 Resultados das análises de laboratório	36
4.10 Análises de variância	38
4.11 Equilíbrio higroscópico do arroz x características do ar de secagem	40
4.12 Considerações finais	41
5 – CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de testar a viabilidade técnica de secagem estacionária com ar desumidificado por refrigeração sem fonte adicional de calor posterior ao resfriamento, tendo como única forma de reaquecimento do ar a compressão adiabática no soprador de ar. Foram realizadas quatro repetições, utilizando-se arroz IRGA 426 reidratado a 29% de umidade, com quatro silos com secagem a ar refrigerado e quatro silos testemunhas com secagem a ar ambiente. Utilizou-se um sistema de aquisição de dados baseado em microcontrolador PIC 18F877A, com três sensores de temperatura, tipo LM35, em cada silo para registrar as temperaturas no fundo, meio e topo e dois sensores de umidade tipo HIH4000 para registrar as umidades relativas de entrada e saída do ar de secagem em cada secador. Um conjunto de termômetros de bulbo úmido e bulbo seco foi utilizado para verificar a temperatura e a umidade relativa do ambiente de trabalho e um multímetro marca Icel, modelo AD-9901T equipado com termopar inserido no coletor de saída do condicionador de ar para registrar a temperatura de saída no trocador de calor. Para acompanhamento da secagem foram realizadas amostras com período de duas horas e analisadas em um medidor de umidade capacitivo marca Dickey-John, modelo GAC 2100, que forneceu os valores de umidade e temperatura do produto. As amostras do produto foram retiradas nas mesmas alturas dos sensores de temperatura do sistema de aquisição de dados. As temperaturas e umidades relativas do ar de secagem foram registradas, desde a saída do condicionador de ar até o topo do secador. Os resultados permitiram concluir que é possível secar sementes e grãos em secadores estacionários com temperaturas abaixo de 20°C, utilizando-se ar desumidificado por refrigeração e o calor gerado na compressão adiabática do soprador como única fonte de calor para reaquecimento do ar de secagem.

Palavras chave: Secagem estacionária, ar desumidificado, secagem de sementes.

ABSTRACT

The present study was aimed testing the technical feasibility of stationary drying with air dehumidified by cooling without additional heat source after cooling, and heat of the air was just by the adiabatic compression in the air blower. Four replicates were performed, using rice IRGA426 rehydrated to 29% moisture, content with four silos with drying air cooling and four silos drying with ambient air. It was utilized an data acquisition system based on PIC18F877A microcontroller, with three temperature sensors, type LM35 in each silo to record the temperature at the bottom, middle and top and two humidity sensors type HIH4000 to record the humidity of inlet and outlet of the drying air in each silo. A set of thermometers wet bulb and dry bulb were used to check the temperature and the relative humidity of the working environment and a multimeter Icel brand, model AD-9901T equipped with thermocouple inserted into the output hopper air conditioner for record the temperature output in the heat exchanger. To follow the drying process, samples with two hours were performed and analyzed on a capacitive moisture meter Dickey-John, model GAC2100, which provided the values of humidity and temperature of the seeds sampled in the same height the sensors of acquisition system temperature. The results show that it is possible to dry seeds and grains with stationary dryer at temperatures below 20°C, using dehumidified air with cooling and the heat generated in the adiabatic compression of the blower as the sole heat source for heating the drying air.

Keywords: stationary drying dehumidified air, drying seeds

1 - INTRODUÇÃO

A produção de grãos no Brasil vem crescendo anualmente e, segundo a Associação Nacional de Defesa Vegetal (ANDEF), tanto o mercado interno quanto o externo apresentarão um forte crescimento. A estimativa até 2019 é que a participação da produção nacional no mercado mundial atinja 40% na soja, 73,5% no óleo de soja, 21,4% no milho. Para alavancar esse acréscimo na produção nacional será necessária, também, a produção de sementes de alta qualidade e em quantidade adequada ao crescimento da produção de grãos. A qualidade de sementes pode ser expressa por atributos como pureza física, germinação, vigor, resistência a doenças e isenção de desenvolvimento de insetos e micro-organismos (PESKE, BARROS E SCHUCH, 2012, p. 31-36).

Dois fatores importantes para garantir a longevidade da semente, tanto em vigor e germinação quanto na isenção de insetos e micro-organismos são a colheita no momento ideal, que preconiza o momento mais próximo da maturidade fisiológica com umidade apropriada à colheita mecânica, e secagem adequada da semente, alcançando valores de umidade que dificultem o desenvolvimento de insetos e de micro-organismos. A secagem faz parte das tecnologias pós-colheita e é um processo de crucial importância na qualidade das sementes, pois, se por um lado não pode melhorar características genéticas e fisiológicas da semente, por outro pode causar diversos tipos de danos em função de temperaturas inadequadas ou tempos excessivamente prolongados de secagem. Segundo Pasqualli (2005, P. 15), o aumento da temperatura de secagem estacionária na faixa de 32 a 50°C aumenta a quantidade de fissuras nas sementes de arroz irrigado e a temperatura de 50°C reduz o potencial fisiológico das sementes. Fields (1992, p. 26) defende que a temperatura da massa de sementes é o principal fator a influenciar no desenvolvimento de insetos.

Peske e Villela (2012, p. 404), apresentam como alternativa para secagem a desumidificação do ar por resfriamento, baixando a temperatura a ponto de saturação para condensar a umidade do ar, reduzindo a razão de mistura de vapor de água no ar, e posterior elevação da temperatura entre 30 e 35°C para redução da umidade relativa, visto que a transferência de umidade, da semente para o ar, se dá por diferencial de pressão de vapor.

Este trabalho visa estudar a viabilidade de secagem de produtos (sementes e grãos) com ar em baixas temperaturas, utilizando processo de desumidificação do ar por refrigeração, sem fontes de calor posterior, tendo como fonte de aquecimento do ar somente o processo adiabático do soprador, buscando levantar o máximo possível de dados referentes a temperaturas e umidade relativa do ar de secagem e temperaturas e umidades da massa do produto.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Produção de sementes de alta qualidade

A produção de sementes de alta qualidade envolve, além de origem conhecida, alta germinação, alto vigor, alta pureza genética, estar livre de doenças, de insetos, de sementes de outras espécies e de plantas daninhas e a colheita no momento ideal. Esse momento é o estágio de maturidade fisiológica, no qual a semente apresenta maior vigor e máxima germinação (PESKE, BARROS E SCHUCH, 2012, p. 54-58), no entanto, segundo eles, nesse estágio as sementes apresentam alto teor de umidade, inviabilizando a colheita mecânica devido à grande suscetibilidade a danos mecânicos que as sementes apresentam com esse grau de umidade. Faz-se necessário, então, esperar pela maturidade de campo, estágio no qual as sementes apresentam um percentual de umidade que permite a colheita mecânica com o mínimo de danos mecânicos. Nesse momento, porém, a umidade das sementes ainda é muito alta para permitir o seu armazenamento e torna-se necessária a secagem artificial. Segundo Pola (1979 apud RANGEL, ZIMMER e VILLELA, 1997), o maior ou menor grau de deterioração depende das condições ambientais. O elevado teor de água contribui para elevar a atividade metabólica e acelerar o processo de deterioração da semente, liberando energia e água (PESKE E VILLELA, 2012, p. 372). Segundo Luz e Luz (2008, p. 8), a água contida nas sementes possibilita o ataque de micro-organismos, que se alimentam por osmose, deteriorando o produto durante o seu desenvolvimento, e a infestação por insetos que utilizam a umidade dos grãos para se desenvolverem. Segundo Fields (1992, p. 26), a infestação por insetos depende, principalmente, da temperatura da massa de sementes conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Temperaturas x desenvolvimento de insetos

Zona	Temperatura (°C)	Efeito
Letal	50 a 60	Morte em minutos
	45	Morte em horas
Sub-ótima	35	Parada no desenvolvimento
	33-35	Desenvolvimento lento
Ótima	25 a 33	Taxa máxima de desenvolvimento
Sub-ótima	20 a 25	Desenvolvimento lento
	13 a 20	Parada no desenvolvimento
Letal	5	Morte em semanas, parada de movimentos
	-10 a -5	Morte em semanas
	-25 a -15	Morte em minutos, congelamento dos insetos.

Fonte: FIELDS, 1992

O fator mais importante que afeta a taxa de respiração de sementes, segundo Baudet (1996 apud SILVA, 2007, p. 22), é a umidade, já que a respiração aumenta de forma exponencial com o aumento da umidade. Park, Antônio e Oliveira, (2007, p. 3-4) classificam a respiração em dois tipos importantes: respiração aeróbica e respiração anaeróbica. A respiração aeróbica é definida por ele como sendo aquela que, ocorrendo na presença do oxigênio contido no ar atmosférico, oxida os carboidratos e gorduras, produz dióxido de carbono, água e libera energia na forma de calor. A respiração anaeróbica ocorre na ausência de oxigênio, sendo efetuada por micro-organismos. Esse processo é denominado de fermentação e libera dióxido de carbono e compostos orgânicos simples. Park, Antônio e Oliveira (2007, p. 4) destacam, ainda, que além do substrato que é consumido, a umidade e a temperatura são os principais fatores que afetam a respiração. Para ele a respiração aumenta rapidamente com o aumento da temperatura e decresce em temperaturas muito elevadas. Decréscimo que é justificado pela inatividade das enzimas nas altas temperaturas. No entanto essas altas temperaturas causam danos às sementes.

Para que as sementes possam ser armazenadas com segurança, o excesso de água nas sementes recém-colhidas deve ser rapidamente removido através de

secagem natural ou artificial, com uso de secadores mecânicos (LUZ e LUZ, 2008, p.8). Lazzari e Lazzari (2014, p.1) dizem que a imediata secagem e o resfriamento das sementes ajudam a evitar a infecção fúngica. Peske e Villela, (2012, p. 371-373) destacam na secagem artificial as seguintes vantagens:

- Aumento do potencial de armazenamento das sementes;
- possibilidade de planejar a colheita;
- execução da colheita por mais horas por dia e mais dias por safra;
- diminuição da perda de sementes por deiscência natural;
- redução do período de permanência das sementes no campo.

2.2 – Métodos de secagem artificial

Dentre os métodos de secagem artificial para sementes, os mais utilizados são intermitente e estacionário (PESKE e BAUDET, 1984 apud PASQUALLI, 2005, p. 3). O método estacionário, basicamente, consiste em submeter à massa de sementes estática à passagem de um fluxo de ar forçado, aquecido ou não, salientando que o fluxo de ar exerce duas funções no processo de secagem (PESKE E VILLELA, 2012, p. 385):

- criar as condições para que ocorra a evaporação da água contida na semente, geralmente transportando calor desde uma fonte até a massa de sementes;
- transportar a umidade retirada da semente para fora do sistema de secagem, permitindo que a umidade que migrou do interior para a superfície da semente continue evaporando.

Consequentemente, o ar deve ter um fluxo mínimo que permita o adequado transporte de calor e água. Park, Antônio e Oliveira (2007, p. 2) observam que ocorrem dois fenômenos simultâneos quando um sólido úmido é submetido à secagem:

- transferência de calor do meio para evaporar a umidade superficial. Transferência que depende de condições externas como temperatura, umidade, vazão e direção do ar de secagem e da área superficial do sólido.
- transferência de umidade do interior para a superfície do sólido e sua posterior evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno de umidade no sólido é função da sua natureza física, da temperatura e do teor de umidade.

O ar de secagem, conseqüentemente, sofre uma queda de temperatura em decorrência de ceder energia térmica para a evaporação da água da semente, porém o balanço energético permanece inalterado uma vez que o ar recupera essa energia na forma de vapor d'água, isto é, o calor sensível que o ar perdeu é recuperado na forma de calor latente (VILLELA E SILVA, 1991 apud GARCIA et al., 2004, p.605).

A secagem estacionária é caracterizada por ocorrer em sucessivas camadas, ou seja: quando a primeira camada atinge o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem, a segunda camada entra em secagem enquanto a terceira permanece úmida por estar adiante da frente de secagem (BOYD, MATTHES e WELCH , 1974 apud PASQUALLI, 2005, p. 3-4).

O gradiente do teor de água entre camadas de sementes, distanciadas de forma diferente em relação ao ponto de entrada do ar, depende da temperatura, da umidade relativa, do fluxo do ar de secagem, do teor de água, da espessura da massa de sementes e da capacidade de transferência de água das sementes para o ar. As sementes, por serem higroscópicas, alteram o seu teor de água de acordo com a umidade relativa do ar ambiente, conseqüentemente quando em contato com o ar, realizam troca até que entrem em equilíbrio energético, térmico e hídrico (SARAVIA, PERES e RISSO, 2007, p.24).

Nas camadas mais afastadas do ponto de entrada do ar de secagem, pode ocorrer aumento do teor de água nas sementes em consequência da condensação provocada pela passagem do ar úmido por camadas com temperaturas mais baixas (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974 apud CAVARIANI, SILVA e MIRANDA, 1999, p. 8).

As sementes sofrem mudanças físicas, durante o processo de secagem, provocadas por gradientes de temperatura que causam contrações, expansões, alterações de densidades e porosidade. O processo de secagem não aumenta o número de sementes quebradas, mas pode causar fissuras internas ou superficiais tornando as sementes suscetíveis a quebras no beneficiamento (VILLELA E SILVA, 1991 apud GARCIA et al., 2001, p. 607). Os danos produzidos por altas temperaturas, na secagem de sementes, têm como causa primária a desintegração das membranas celulares, possivelmente, por alterações nos lipídios que as constituem. Os danos fisiológicos decorrentes da secagem podem ainda se refletir

em alterações nos sistemas subcelulares, cromossomas e mitocôndrias, na redução do número de grãos de amido no eixo embrionário, em aumentos de lixiviação de eletrólitos, redução de permeabilidade de membranas celulares e taxa respiratória (CAVARIANI, SILVA e MIRANDA, 1996 apud GARCIA et al., 2001 , p.607).

Peske e Villela (2012, p 404-405) destacam que em regiões nas quais as sementes são colhidas com temperaturas que variam, normalmente, entre 25°C e 40°C os lotes de sementes, comumente apresentam temperaturas em torno de 30°C em sua massa. Nessas condições o resfriamento e a secagem devem ser realizados com a maior brevidade para preservar os atributos genéticos e sanitários das sementes.

A secagem com secadores estacionários oferece a vantagem de reduzir os danos mecânicos nas sementes, porém o maior tempo de secagem fez com que os produtores aumentassem a temperatura de secagem. No entanto, a relação de temperaturas maiores com possíveis prejuízos para as sementes torna o processo complexo (LEVIEN, 2005, p 6-7).

2.3 – Processo de aquecimento do ar de secagem

Rossi e Roa (1980 apud Rangel, Zimmer e Villela 1997, p. 1082) propõem que a secagem pode ser realizada com ar ambiente, adequadamente escolhido, com umidade relativa igual ou inferior a 70%, sem nenhuma fonte de calor, no entanto alerta para um possível aquecimento do ar ao passar pelo ventilador. O aquecimento do ar no ventilador pode ser decorrente de dois fenômenos:

- aquecimento devido ao processo adiabático de compressão do ar. Processo adiabático é aquele que ocorre muito rápido ou em ambiente muito bem isolado sem troca de calor entre o sistema e o ambiente. Dessa forma a energia que entra pelo eixo do motor é acrescida ao sistema e, como consequência no ventilador, o volume do gás diminui, aumentando a pressão e temperatura (HALLIDAY, RESNIK e WALKER, 2009, p.198)

- condução térmica do calor gerado pelo motor, através do eixo e carcaça do ventilador. A energia térmica, na forma de calor, é transferida de um corpo a outro por um diferencial de temperatura, sempre do corpo com maior temperatura para o corpo com menor temperatura (HALLIDAY, RESNIK e WALKER, 2009, p. 200)

A geração de calor no motor se deve ao atrito de mancais e principalmente ao efeito Joule decorrente da circulação de corrente elétrica nos enrolamentos do motor e das correntes de Foucault que circulam nos núcleos da carcaça e do rotor. Em um motor elétrico parte da energia é transformada em campo magnético pelas suas bobinas, chama-se a esse circuito de reativo, porém esses condutores possuem resistência, chamado de circuito resistivo. Nesse circuito, parte da energia é transformada em calor. Quando uma corrente elétrica produz calor, ao passar por uma resistência, diz-se que ocorreu efeito Joule. Como os núcleos das bobinas do motor são feitos de material ferro-magnético, que também é condutor, ocorrerá sobre eles uma indução de força eletromotriz (f.e.m.), quando estiverem sujeitos às variações de fluxo magnético decorrentes do funcionamento do motor. Esses núcleos se comportam como um circuito elétrico fechado de baixa resistência. Logo as f.e.ms. darão origem a fortes correntes no núcleo metálico, denominadas correntes de Foucault, que também promovem geração de calor por efeito Joule no núcleo das bobinas (TAVARES, 2011, p. V-112 - V-13 e XIII-10 – XIII-11).

2.4 – Desumidificação do ar por resfriamento

A secagem com ar desumidificado por resfriamento consiste em uma alternativa viável para a secagem de sementes, seja na secagem estacionária ou na intermitente. Método, esse, que consiste em baixar a temperatura do ar abaixo do ponto de saturação para que ocorra a condensação do vapor de água contido no ar e, dessa forma, reduzir a razão de mistura de vapor de água no ar (REDU et al., 2006, 1-3). Posteriormente, o ar é reaquecido, em torno de 25°C a 30°C, para elevar sua capacidade de retenção de umidade (PESKE E VILLELA, 2012, P. 404-405).

Embora já existam equipamentos comerciais para secagem e aeração de produtos (sementes e grãos) com ar desumidificado, todos se baseiam no processo de resfriamento e pós-aquecimento do ar de secagem. É importante que os estudos nessa área continuem na busca pela otimização do sistema e dos reflexos que o processo representa na qualidade dos produtos.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Local e material

O presente trabalho foi conduzido, no mês de abril de 2014, em um laboratório particular, situado no bairro Areal na cidade de Pelotas, estado do Rio Grande do Sul.

Foram utilizados grãos de arroz da variedade IRGA 426 já beneficiados, na quantidade de 130 kg, acondicionados em três sacos com as respectivas umidades de 15,3%, 14,8% e 14,5%. O produto (grãos ou sementes de arroz) foi inicialmente misturado, com a ajuda de uma betoneira, para obter homogeneização e uma umidade média de 14,8%, visto que estava dividido em quantidades iguais de 43 kg. À massa total de produto foram adicionados 13,26 litros de água para obter umidade de 25%, conforme Luz e Luz (2008, p. 22-23), que propõem o cálculo de umidade percentual como:

$$bu = \frac{m_a}{m_{mu}} * 100 = \frac{m_a}{m_a + m_s} * 100$$

no qual:

bu= teor de água em base úmida (%)

ma= massa de água (g, kg)

m_{mu}= massa de matéria úmida (g, kg)

m_s= massa de matéria seca (g, kg)

$$25 - 14,8 = \frac{m_a}{130kg} * 100$$

$$m_a = \frac{10,2 * 130kg}{100} = 13,26kg$$

Para obter uma umidade homogênea a água foi acrescentada ao produto, com o auxílio de uma betoneira, que depois de umedecido foi acondicionado em um refrigerador por um período de sete dias a uma temperatura de 5±2°C, em sacos plásticos hermeticamente fechados. Dessa forma, a umidade ficou homogênea nos

tecidos do produto. Depois de decorrido o período de sete dias, a umidade do produto foi novamente medida, no medidor capacitivo de umidade.

As secagens foram realizadas em quatro silos estacionários (secadores) de fundo falso perfurado, dois com aplicação de ar refrigerado e dois com ar ambiente para servirem de testemunhas.

Os secadores foram construídos com tubos de PVC de 200 mm de diâmetro e com 1,2 m de altura. O fundo falso perfurado foi colocado a 170 mm de distância do fundo. Nos secadores, a 120 mm, 490 mm e 850 mm acima do fundo falso, foram abertos furos de 50 mm de diâmetro e fechados com uma placa de borracha, de 10 mm de espessura, com dois cortes cruzados, funcionando como válvula, para a inserção do coletor de amostra.

Os sopradores utilizados no experimento são sopradores de folha, marca Makita, modelo MUB102, com potência de 500 Watts, possibilidade de controle de rotação de 8500 a 16000 rpm e capacidade de deslocamento de $2,4\text{m}^3.\text{min}^{-1}$.

Para resfriamento do ar foi utilizado um condicionador de ar marca Consul, tipo *split*, com unidade externa modelo CBY12CBBNA e unidade interna modelo CBV12CBBNA, com capacidade de refrigeração de 3,52 kW (12000 BTU.h⁻¹). Foi adaptado, na saída de ar do condicionador, um coletor confeccionado em fibra de vidro com dois bocais de saída, nos quais foram acopladas mangueiras corrugadas de 50 mm de diâmetro para conduzir o ar até a sucção dos sopradores que receberam bocais iguais, confeccionados em impressora 3D, para conexão das mangueiras. Os quatro sopradores receberam bocais iguais, permitindo alterar, na repetição, os secadores tratados com ar refrigerado e os secadores tratados com ar ambiente, proporcionando casualização na repetição. A Figura 1 mostra o equipamento montado.

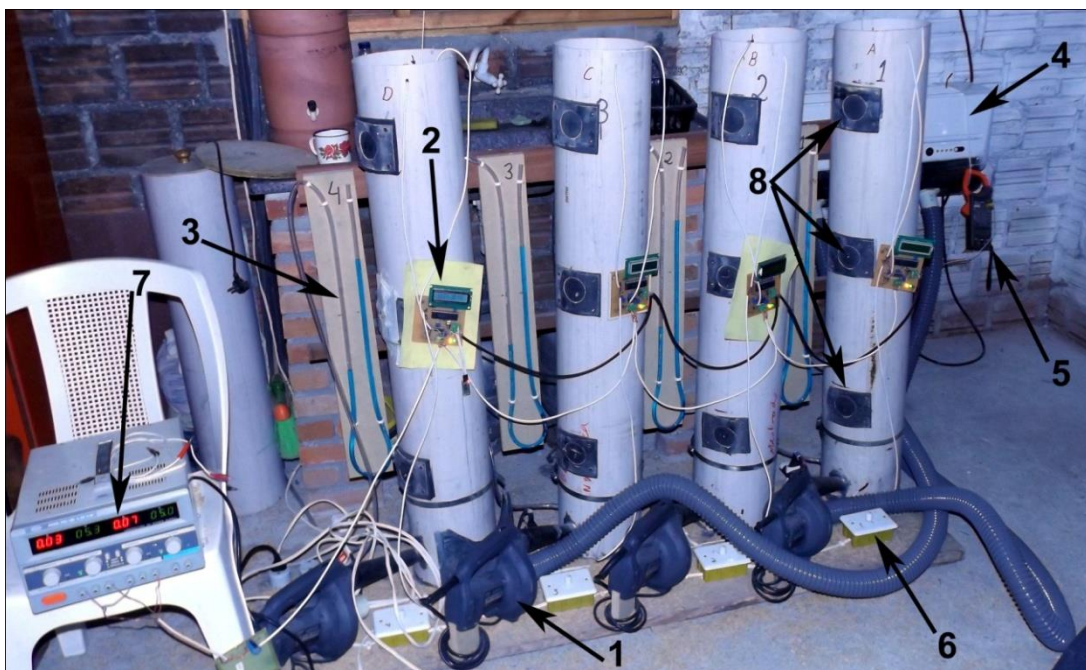


Figura 1 – Conjunto de silos secadores

(1 – Soprador de ar; 2 – Placa de aquisição de dados; 3- Manômetro de coluna de água; 4 – Trocador de calor do condicionador de ar; 5 – Multímetro para medição da temperatura de saída do condicionador de ar; 6 – *Dimmer* para controle de potência elétrica; 7 – Fonte de corrente contínua para alimentação do sistema de aquisição; 8 – Bocais de amostragem dos secadores)

Abaixo do fundo perfurado foi conectada uma mangueira plástica transparente de 8 mm de diâmetro interno, com as quais foram construídos manômetros de coluna d'água para medir a pressão estática, em milímetros de coluna de água (mmca), durante o processo de secagem.

Utilizaram-se dois termômetros, um de bulbo úmido e um de bulbo seco (psicrômetro) para leitura das temperaturas do ambiente e consequente obtenção das umidades relativas do ambiente. As leituras foram realizadas nos momentos das leituras de umidade das amostras.

Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para analisar e armazenar as umidades relativas de entrada e saída do ar de secagem e as temperaturas do ar no fundo, meio e topo dos secadores. Os sensores de umidade relativa utilizados são do modelo HIH4000, um colocado sob o fundo falso e outro no topo do secador, acima da superfície da camada de grãos. Para aquisição de temperatura foram utilizados sensores do modelo LM35, instalados nas mesmas alturas dos orifícios de

coleta de amostras. O sistema foi comandado por um microcontrolador PIC 16F877A e transmitido para o um computador tipo PC através de um transmissor *Bluetooth*. A frequência de amostragem utilizada foi em torno de 1,6 segundos. O *software* de aquisição foi desenvolvido em linguagem C++. O sistema de aquisição de dados realizou amostragens em intervalos muito pequenos gerando uma série de aproximadamente 35.000 dados por variável. Considerando que o tempo de resposta das variáveis envolvidas, temperatura e umidade relativa, é lenta, utilizou-se uma rotina, no programa Microsoft Excel, para gerar médias em intervalos de tempo de aproximadamente 8 minutos, visto que esse programa tem sua capacidade de geração de gráfico limitada a 32.000 dados por variável. A Figura 2 mostra a interface do *software* de aquisição de dados.

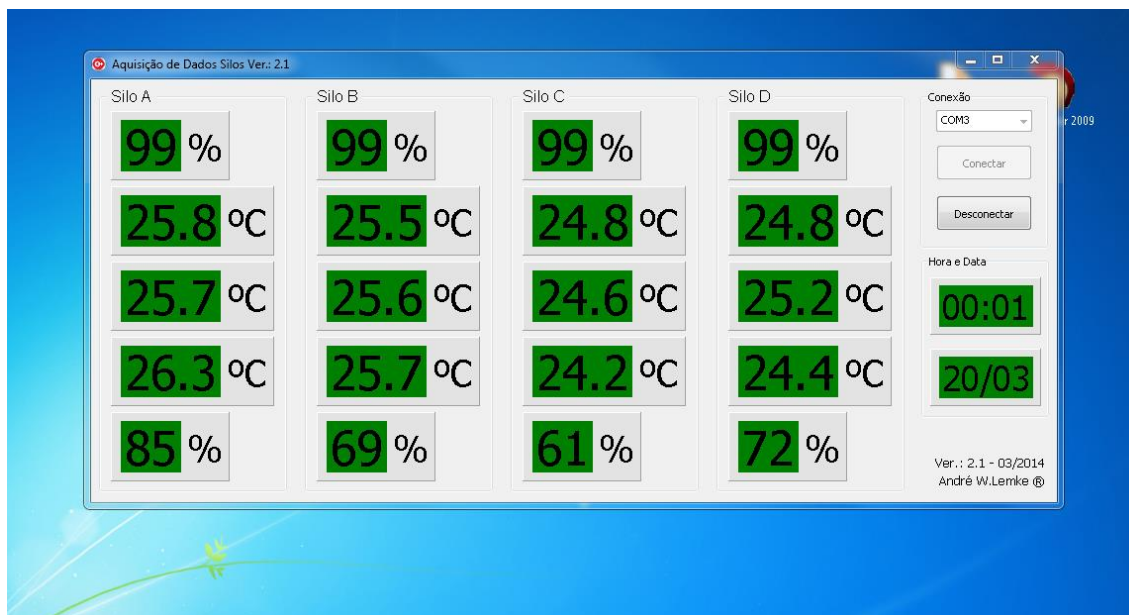


Figura 2 - Interface do programa de aquisição

Utilizou-se um medidor de umidade capacitivo marca Dickey-John, modelo GAC 2100, para análise das amostras durante o processo de secagem, devido a sua rápida resposta e por ser um ensaio não destrutivo, servindo esse de referência para determinar o momento de desligar os secadores. Adotou-se o intervalo de amostragem de duas horas devido à resposta lenta que esse sistema de secagem apresenta.

Foi também registrada a temperatura de saída do sistema de condicionamento de ar com um multímetro marca Icel, modelo AD-9901T, equipado

com um termopar que foi inserido no coletor instalado na saída do condicionador de ar.

Para uma análise mais detalhada foi realizado um teste de umidade no laboratório de sementes da Faculdade Eliseu Maciel, utilizando secagem em estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24hs com pesagem inicial e final da massa de grãos (BRASIL, 2009, p. 308-318).

A análise dos dados foi realizada com auxílio de dois *softwares*, o Microsoft Excel para geração de gráficos e a análise estatística realizada com Sasm-Agri (CANTERI et al., 2001).

3.2 – Metodologia de secagem

As secagens dos grãos de arroz foram realizadas em duas etapas: uma no dia 07 de abril e a outra no dia 28 de abril de 2014. Em ambas utilizaram-se dois secadores com aplicação de ar refrigerado e dois com ar ambiente, totalizando dois tratamentos com quatro repetições cada. Na primeira etapa os secadores A e B receberam ar refrigerado e os secadores C e D receberam o ar ambiente. Na segunda etapa os secadores A e C receberam ar refrigerado e os secadores B e D ar ambiente. A disposição dos tratamentos foi sorteada para obter um delineamento experimental completamente casualizado, diminuindo a influência que alguma diferença entre os equipamentos usados pudesse causar no experimento.

O experimento consistiu em realizar a secagem do produto com ar desumidificado por resfriamento, sem fontes de calor posterior, tendo como única influência sobre a temperatura de entrada do ar, nos secadores, a troca térmica ao longo da mangueira de conexão entre o condicionador de ar e os sopradores e o aquecimento ocorrido nos sopradores, decorrente do processo de compressão adiabática do ar e da condução de calor, via carcaça e eixo do soprador, do calor gerado no motor elétrico.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Acompanhamento da secagem por amostragem

A frente de secagem foi acompanhada com as análises de umidade realizadas com o medidor de umidade capacitivo e, baseado nesses resultados, a secagem foi interrompida quando a umidade do produto atingiu níveis de umidade adequados para um armazenamento mais longo e seguro. Os sistemas de secagem foram desligados quando a queda de umidade, na camada de produto do topo do secador, tornou-se inferior ou igual a 0,2 pontos percentuais por hora, somada a uma umidade inferior a 14,5% ou quando a umidade das sementes na camada do topo atingiu um valor inferior a 13%.

As pressões estáticas do ar de secagem na entrada dos secadores, registradas nos manômetros de coluna de água durante o processo de secagem, foram de 157, 143, 130 e 135 mmca nos secadores A, B, C e D, respectivamente, no dia 07 e de 129, 125 e 136 mmca nos secadores B, C e D no dia 28. No secador A, talvez por acidente durante a amostragem, o soprador ficou desregulado e não iniciou a secagem com a vazão máxima, portanto registrou durante as primeiras 4 horas, uma pressão estática de 88 mmca e, após verificado o problema, foi reajustado atingindo a pressão de 135 mmca. Isso pode ter causado o tempo de secagem maior do secador A no dia 28. As diferentes pressões registradas nos mesmos secadores nos diferentes dias são, provavelmente, decorrentes das diferentes perdas de carga causadas pela alimentação dos sopradores que, quando usados, nos secadores testemunhas aspiram o ar diretamente da atmosfera e, quando usados nos secadores com tratamento, são ligados ao condicionador pelas mangueiras corrugadas ou, ainda, da variação de rotação nos motores em consequência das variações de tensões da rede elétrica, uma vez que, por se tratarem de motores de corrente alternada tipo universais (motores de corrente contínua adaptados para corrente alternada), tem a sua rotação de trabalho muito suscetível às variações de tensão da rede de alimentação.

Os resultados das amostragens, referentes aos dias 07 e 28, respectivamente, podem ser verificados nas Tabelas 2 e 3 que apresentam os horários de amostragem, as umidades, temperaturas e densidades dos grãos no fundo, meio e topo do secador, além de apresentarem a temperatura de saída do ar no bocal de saída do condicionador de ar, as temperaturas de bulbo seco (tbs) e

bulbo úmido (tbu) no ambiente onde os secadores estavam instalados e a umidade relativa do ambiente, obtida em tabela utilizando-se os valores de tbs e tbu.

Tabela 2 - Dados das amostragens do dia 07

Hora	Posição no silo	A refrigerado			B refrigerado			C ambiente			D ambiente			Temp. saída Ar Cond. (°C)	Temp. BS Amb. (°C)	Temp. BU Amb. (°C)	Humidade relativa do ambiente (%)
		Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.				
10:15	Topo	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578	13	25,5	23	88
	Meio	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578				
	Fundo	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578	22	9,2	578				
12:15	Topo	23,4	13,1	589	22,9	16,8	589	25,2	22,7	588	22,6	23,8	589	11	26,5	24	80
	Meio	22,6	15,4	589	20,9	15,3	586	24,5	24,6	583	19,6	26,6	577				
	Fundo	17,8	18,6	578	18,4	14,9	581	15,3	30,8	566	15,3	33,9	567				
14:15	Topo	20,2	12,7	573	24,9	11,8	573	18,1	23,7	568	16,3	28,1	561	8	25,5	23,5	84
	Meio	18,9	15,1	574	19,2	15,3	569	16,8	25,8	557	14,5	31,1	563				
	Fundo	17,2	17,4	564	17,2	15,4	567	13,6	28,9	558	11,8	34,9	566				
16:15	Topo	17,6	14,5	569	19	12,9	573	16	24,7	561	14,7	29,5	557	8	25	23,5	88
	Meio	18	15,9	572	18,6	16,4	558	15,9	26,5	549	17,7	32,5	556				
	Fundo	16,1	16,8	558	17,1	15,8	564	13,4	28,9	556	11,7	35,1	559				
18:15	Topo	16,8	16,4	570	18,5	14,3	562	14,9	26,9	557	12,8	31,8	553	9	25	23	84
	Meio	16,7	17,4	570	18,4	13,9	557	14,5	29,8	559	12,9	33,3	556				
	Fundo	15,8	17,6	560	16,7	13,4	569	12,3	32,6	552	11,1	34,6	553				
20:15	Topo	16,3	17,2	567	17,3	14,9	572	13,5	29,6	557	Concl	Concl	Concl	11	24,5	23	87
	Meio	16,4	16,9	568	17,7	14,5	569	13,3	31	552	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	15,1	19,3	565	16,1	14,5	556	11,6	33,8	549	Concl	Concl	Concl				
22:15	Topo	15,8	19,3	570	16,9	17,3	574	12,7	31,1	557	Concl	Concl	Concl	13	24,5	22,5	83
	Meio	15	20	561	16,3	19,3	561	12,2	32,1	547	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	14,7	20,9	547	15,4	20,7	559	11,4	34,3	548	Concl	Concl	Concl				
00:15	Topo	15,1	15,3	565	16	15	573	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	12	24	22,5	87
	Meio	14,4	15,6	556	15,1	16,7	559	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	14,3	16,9	545	14,9	18,2	559	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
02:15	Topo	14,6	16	562	15	17,5	566	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	17	23,5	22	87
	Meio	14,3	17,3	560	14,7	19,4	561	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	13,7	18,2	554	14,2	20,2	558	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
08:30	Topo	14,5	15,8	555	15,1	16,6	557	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	8	23,5	22,5	91
	Meio	14,1	16,3	557	14,3	18,1	555	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	13,8	16,7	556	14,1	18,3	553	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
10:30	Topo	14,3	16,9	553	14,4	18,4	543	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	10	24,5	23	87
	Meio	14	16,5	553	14,3	18,6	554	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
	Fundo	13,7	16,8	550	14	18,9	550	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl				
12:30	Topo	13,7	16,8	558	14,1	18,9	556	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	8	26	23,5	78
	Meio	13,8	17,2	552	14	16	558										
	Fundo	13,4	16,6	546	13,8	16,7	549										
14:30		Concl	Concl	Concl	Concl	Concl	Concluido										85,333333
Tempo de secagem		20h			20h			12h			8h						

Tabela 3 - Dados das amostragens do dia 28

Hora	Posição no silo	A refrigerado			B ambiente			C refrigerado			D ambiente			Temp. saída Ar Cond. (°C)	Temp. BS Amb. (°C)	Temp. BU Amb. (°C)	Humidade relativa do ambiente (%)
		Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.	Umid. (%)	Temp. (°C)	Dens.				
Início 9:00	Topo	21,9	12	588	21,8	12,3	590	22	12,2	586	21,8	10,9	581	5	19,5	17	76
	Meio	21,9	12	588	21,8	12,3	590	22	12,2	586	21,8	10,9	581				
	Fundo	21,9	12	588	21,8	12,3	590	22	12,2	586	21,8	10,9	581				
11:00	Topo	22	14,6	587	22,4	19,4	591	21,6	15,9	580	22,5	19,6	588	15	21,5	19	69
	Meio	21,8	15,8	590	21,8	19,5	586	21,8	14,6	585	19,3	24	583				
	Fundo	18,5	18,8	585	16	27,1	580	17,4	19,9	587	15,1	29,7	584				
13:00	Topo	20,9	11,7	588	19,1	20,7	583	19,3	12,4	580	18,7	22,7	579	12	23,5	19,5	67
	Meio	20,4	10,1	584	16,9	24,9	581	18,2	17	580	16	27,8	583				
	Fundo	17,7	13,2	585	13,6	29,6	574	16	19,6	586	12,8	32,7	571				
15:00	Topo	19,5	14	582	16,4	22,1	574	17,7	10,8	581	13,6	24	563	11	23,5	20	71
	Meio	19,1	15,8	582	15,3	26,1	579	17,6	13,7	579	13,6	29	575				
	Fundo	17,1	15,5	586	12,7	29,9	557	15,9	17,4	581	11,8	31,9	557				
17:00	Topo	18,9	8,3	581	14	24,5	564	16,6	11	577	13,8	24,3	559	8	21,5	18,5	73
	Meio	18,3	8,7	590	14,1	26,3	566	16,4	13,3	578	14,1	27,5	571				
	Fundo	16,1	11,9	573	12,3	27,7	552	14,6	16,4	565	11,5	30,5	549				
19:00	Topo	18,1	9,1	576	13,3	25,4	565	15,9	16,1	574	13,2	26,4	563	6	21,5	18	70
	Meio	17,9	12,9	574	14	26,1	567	16,2	12	572	13,6	27,6	570				
	Fundo	16,3	12,5	574	12	27,4	547	14,7	12,3	567	11,4	29,2	549				
21:00	Topo	17,5	12,6	573	12,8	24,7	557	15,5	14,6	571	12,7	28,4	562	18	20	17,5	77
	Meio	17,4	14,3	575	13	25,4	557	15,8	16,1	574	13	28,9	561				
	Fundo	15,9	16,4	571	11,6	27,3	550	14,5	17,8	568	11,1	30,7	545				
23:00	Topo	17,3	13	579	hcluido	hcluido	hcluido	14,8	15,6	569	hcluido	hcluido	hcluido	9	19	17	81
	Meio	17,2	15,6	581	hcluido	hcluido	hcluido	15,4	16,9	564	hcluido	hcluido	hcluido				
	Fundo	15,7	17,3	576	hcluido	hcluido	hcluido	14,2	18,5	562	hcluido	hcluido	hcluido				
11:00	Topo	16,7	12,9	575				14,7	13,8	561				5	24,5	21,5	75
	Meio	16,6	11,3	572				14,7	16	564							
	Fundo	15,3	13,5	573				13,8	18	558							
13:00	Topo	16,4	13	569				14,3	15	563				4	25,5	21,5	68
	Meio	16,1	12,7	567				13,8	16	557							
	Fundo	15	11	570				13,4	14,3	559							
15:00	Topo	16	12,5	570				14,1	19,8	567				2	22,5	20	78
	Meio	15,5	14,3	572				13,9	17,2	566							
	Fundo	14,7	10,4	569				13	17,4	568							
17:00	Topo	14,9	9,1	570				Concluido	hcluido	hcluido				5	20,5	18	81
	Meio	15,1	9,9	568				Concluido	hcluido	hcluido							
	Fundo	14,4	8,5	565				Concluido	hcluido	hcluido							
19:00	Topo	14,6	9,4	571										7	19	16	72
	Meio	14,5	9,6	568													
	Fundo	14,1	8,9	564													
21:00	Topo	14,4	9,6	572										4	18	16	80
	Meio	14,2	9,4	569													
	Fundo	13,9	7,1	566													
	Concluido	hcluido	hcluido														
	Concluido	hcluido	hcluido														
	Concluido	hcluido	hcluido														
Tempo de secagem		24h			12h			18h			12h						74,142857

4.2 – Análise gráfica da umidade do produto durante o processo

A partir dos dados das amostragens foram confeccionados os gráficos das Figuras 3 a 10, que mostram o comportamento das curvas de umidade do produto nas três alturas de amostragem do secador.

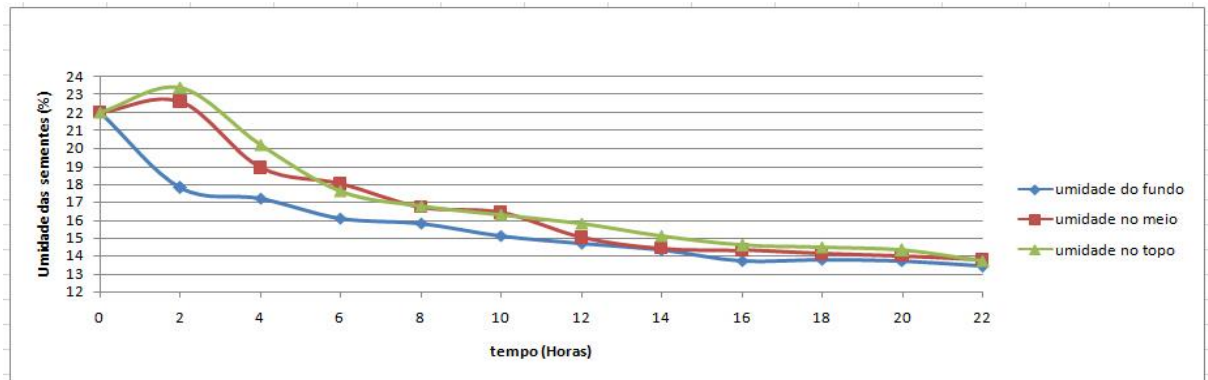


Figura 3 - Umidade do produto no secador refrigerado A - 07/04

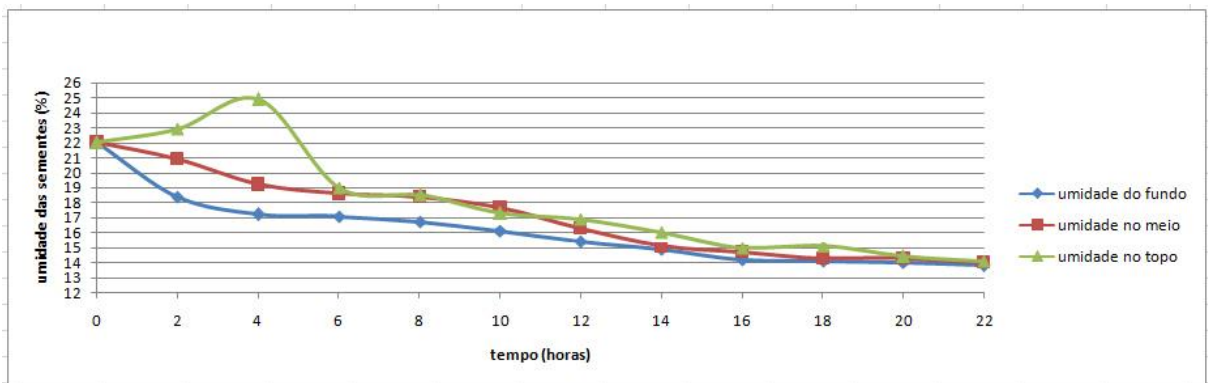


Figura 4 - Umidade do produto no secador refrigerado B - 07/04

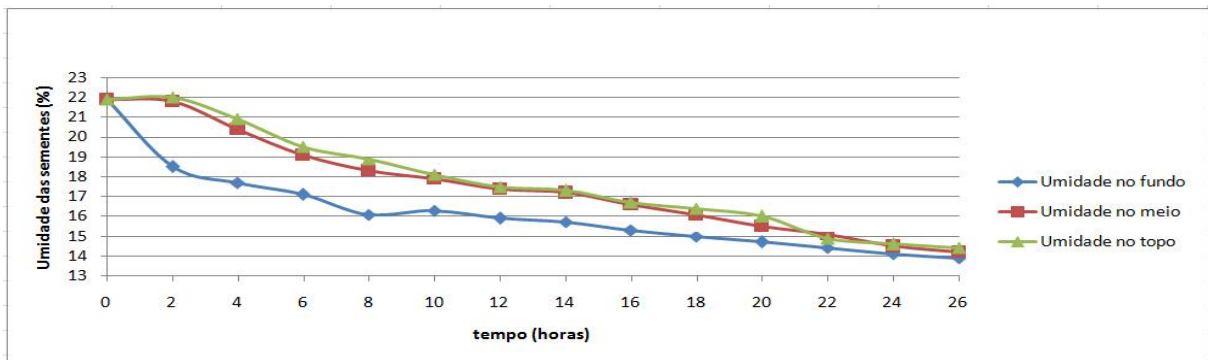


Figura 5 - Umidade do produto no secador refrigerado A - 28/04

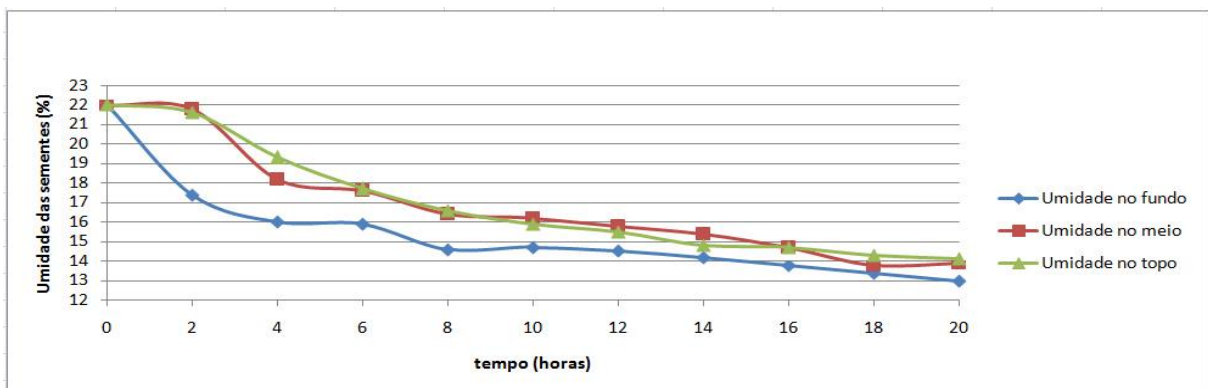


Figura 6 - Umidade do produto no secador refrigerado C - 28/04

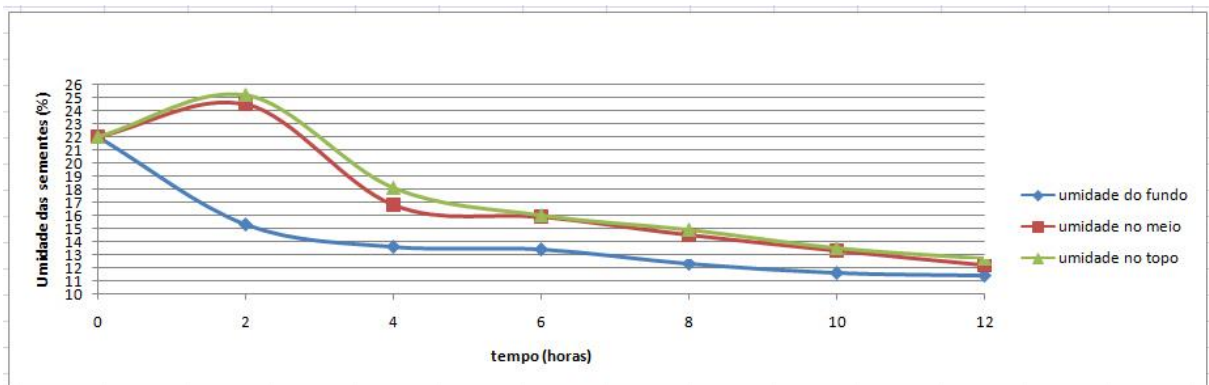


Figura 7- Umidade do produto no secador com ar ambiente C - 07/04

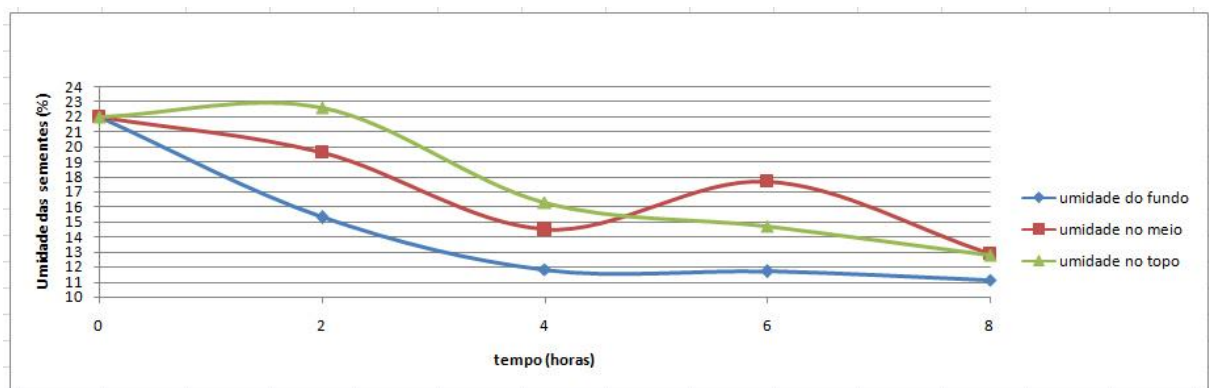


Figura 8- Umidade do produto no secador com ar ambiente D - 07/04

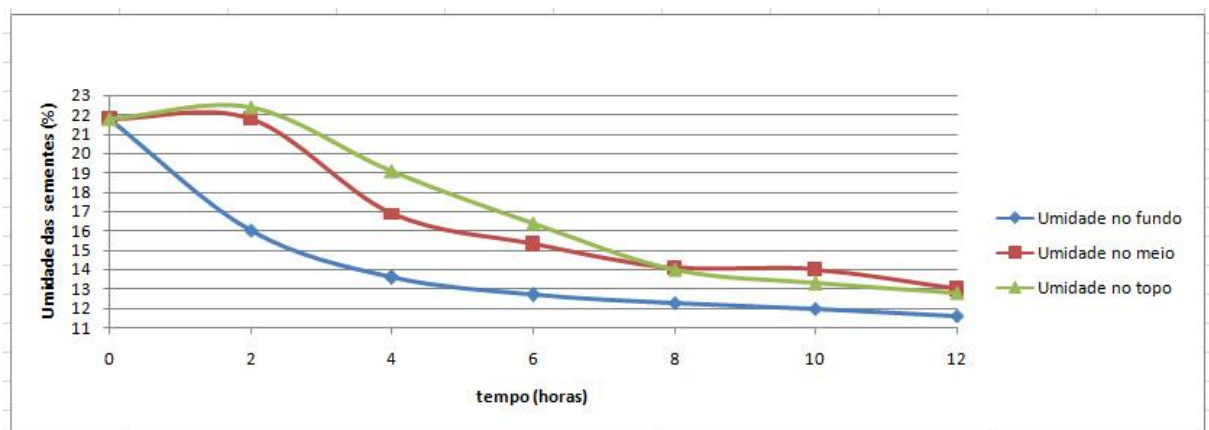


Figura 9 - Umidade do produto no secador com ar ambiente B - 28/04

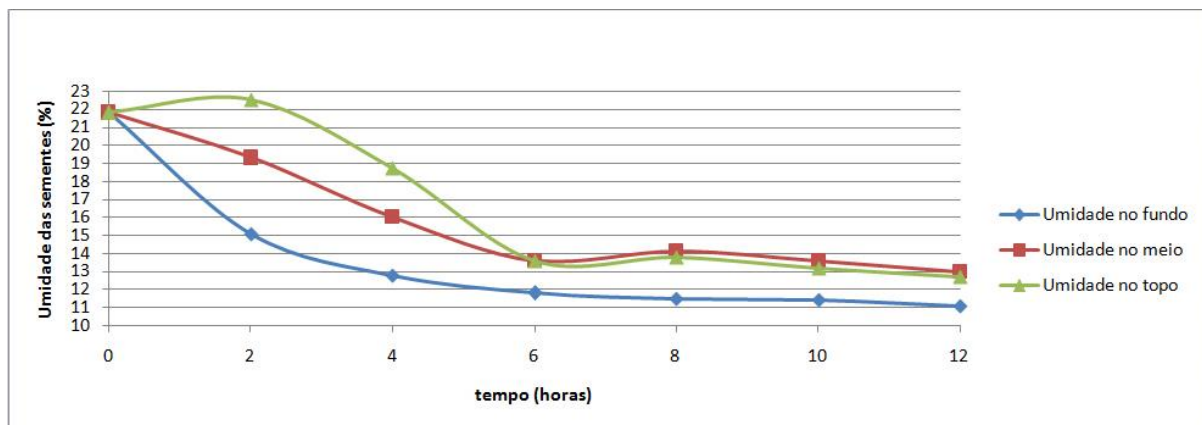


Figura 10 - Umidade do produto no secador com ar ambiente D - 28/04

Observa-se que em todos os secadores, tanto com ar refrigerado como com ar ambiente, o comportamento das umidades no meio e no topo foram semelhantes, apresentando um crescimento inicial evidenciando a absorção de água pelo produto e corroborando com as teorias de Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974 apud CAVARIANI et al. 1999, p. 8), que salientam que pode ocorrer aumento da umidade do produto nas camadas mais afastadas do ponto de entrada de ar devido à condensação de umidade, em consequência da passagem de ar muito úmido por camadas de produto com temperaturas mais baixas. O aumento da umidade, nas amostras do meio e do topo do secador, é reforçado pela análise dos valores de umidade relativa do ar no topo do secador, monitorados pelo sistema de aquisição de dados e apresentados nas figuras 11 a 18. Nos momentos iniciais da secagem o ar na saída do secador apresentou umidade relativa próxima a 100%.

A umidade o produto nas quatro repetições dos secadores tratados com ar refrigerado apresentou uma média de 13,9% e as repetições dos secadores tratados com ar ambiente uma média de 12,3%.

4.3 – Aquisição de dados do processo de secagem

As Tabelas 4 e 5, apresentam os dados armazenados pelo sistema de aquisição nos dias 07 e 28, respectivamente.

Silo A - Refrigerado				Silo B - Refrigerado				Silo C - Ar ambiente				Silo D - Ar ambiente				Sistema	
Umid ade Topo (%)	Umid ade Fund o (%)	Temp meio (°C)	Temp fundo (°C)	Umid ade Topo (%)	Umid ade Fund o (%)	Temp meio (°C)	Temp fundo (°C)	Umid ade Topo (%)	Umid ade Fund o (%)	Temp meio (°C)	Temp fundo (°C)	Umid ade Topo (%)	Umid ade Fund o (%)	Temp meio (°C)	Temp fundo (°C)	Hor (h:mm:ss)	Data (dd/mm/aa)
99.0	61.3	12.9	13.1	99.0	66.1	12.6	12.6	99.0	63.2	12.7	13.8	99.0	60.5	11.8	12.9	20.06	12:03:03 07/04/2014
99.0	63.9	13.9	13.7	99.0	68.8	14.6	13.8	99.0	51.3	21.1	23.0	99.0	63.3	12.7	23.5	26.1	10:28:04 07/04/2014
99.0	61.7	13.0	12.8	99.0	65.7	13.5	13.3	99.0	51.0	21.5	21.6	99.0	61.7	12.3	21.8	30.8	10:36:28 07/04/2014
99.0	61.7	12.3	11.8	99.0	68.5	12.9	11.6	99.0	51.4	21.5	21.3	99.0	61.7	12.3	21.8	31.8	10:44:53 07/04/2014
99.0	61.4	11.5	11.4	99.0	68.4	11.5	11.0	99.0	50.7	21.2	21.1	99.0	61.4	11.5	21.6	32.1	10:53:18 07/04/2014
99.0	61.1	11.1	11.2	99.0	67.4	11.0	10.7	99.0	50.4	21.0	21.2	99.0	61.1	11.1	21.9	32.4	11:01:43 07/04/2014
98.9	61.7	10.7	11.4	99.0	67.4	10.7	10.3	99.0	50.2	21.1	21.4	99.0	61.7	10.7	21.4	32.7	11:12:23 07/04/2014
99.0	61.1	12.4	14.3	99.0	68.1	12.1	11.9	99.0	48.8	21.3	24.4	99.0	61.1	12.4	24.3	33.5	12:04:17 07/04/2014
99.0	62.9	12.1	15.2	99.0	68.4	11.9	15.1	99.0	49.1	21.1	25.1	99.0	62.9	12.1	25.2	33.3	12:09:29 07/04/2014
99.0	61.7	11.8	14.6	99.0	69.0	11.2	11.8	99.0	49.3	20.9	25.2	99.0	61.7	11.8	25.2	33.6	12:28:24 07/04/2014
99.0	61.8	11.6	14.7	99.0	68.9	11.0	11.9	99.0	49.5	20.8	25.2	99.0	61.8	11.6	25.3	32.9	12:36:49 07/04/2014
99.0	62.2	11.5	14.7	99.0	69.3	10.9	11.9	99.0	49.7	20.8	25.4	99.0	62.2	11.5	25.4	33.1	12:45:13 07/04/2014
94.0	62.0	11.7	14.9	99.0	69.3	10.9	12.2	99.0	49.3	21.0	25.7	99.0	62.0	11.7	25.7	33.3	12:53:38 07/04/2014
99.0	62.1	11.7	15.0	99.0	69.8	10.9	12.3	99.0	49.3	21.1	25.9	99.0	62.1	11.7	25.8	33.7	13:02:03 07/04/2014
99.0	62.9	12.0	15.2	99.0	70.6	11.1	12.7	99.0	49.5	21.3	26.1	99.0	62.9	12.0	26.1	33.5	13:10:28 07/04/2014
99.0	62.9	12.1	15.2	99.0	70.7	11.4	12.9	99.0	49.1	21.2	26.2	99.0	62.9	12.1	26.3	33.4	13:18:57 07/04/2014
99.0	62.8	12.7	15.2	99.0	70.6	11.4	13.2	99.0	49.7	21.4	26.3	99.0	62.8	12.7	26.3	33.5	13:27:17 07/04/2014
99.0	62.6	12.1	15.3	99.0	70.4	11.3	13.0	99.0	48.9	21.6	26.5	99.0	62.6	12.1	26.8	33.7	13:35:42 07/04/2014
89.5	61.8	13.2	15.4	99.0	69.7	11.5	13.1	99.0	48.6	22.3	25.9	99.0	61.8	13.2	26.8	33.7	14:34:25 07/04/2014
73.6	61.4	14.3	15.6	99.0	68.2	11.9	13.3	99.0	47.2	22.5	25.2	99.0	61.4	14.3	26.8	31.8	15:43:21 07/04/2014
72.8	61.1	14.3	15.4	99.0	69.3	12.1	13.2	99.0	48.9	22.5	25.7	99.0	61.1	14.3	27.4	31.7	16:16:32 07/04/2014
72.1	61.0	14.5	15.4	99.0	71.6	12.2	13.1	99.0	48.2	22.1	25.6	99.0	61.0	14.5	27.4	32.5	17:32:39 07/04/2014
72.2	61.0	14.6	15.5	99.0	70.0	12.3	13.2	99.0	48.2	22.1	25.6	99.0	61.0	14.6	27.4	32.7	17:41:11 07/04/2014
72.0	61.0	14.7	15.5	99.0	70.0	12.3	13.2	99.0	48.2	22.1	25.6	99.0	61.0	14.7	27.4	32.7	17:41:11 07/04/2014
71.0	60.7	14.8	15.6	99.0	80.2	69.9	12.4	13.3	99.0	55.9	24.1	25.8	99.0	60.7	14.8	32.6	17:57:54 07/04/2014
80.7	71.2	14.9	15.9	99.0	86.4	82.9	12.4	13.3	99.0	61.1	44.3	24.3	99.0	71.2	14.9	32.7	18:06:19 07/04/2014
76.8	62.2	15.7	16.8	99.0	85.0	67.9	13.0	14.1	99.0	85.1	41.2	25.4	99.0	62.2	15.7	34.3	18:14:43 07/04/2014
70.2	63.0	15.7	16.3	99.0	80.4	68.5	12.5	12.6	99.0	81.6	44.4	25.0	99.0	63.0	15.7	32.6	18:23:08 07/04/2014
72.0	62.9	15.6	16.2	99.0	76.3	68.5	11.6	12.1	99.0	81.0	43.9	25.0	99.0	62.9	15.6	32.6	18:31:33 07/04/2014
70.5	62.1	15.7	16.1	99.0	77.2	68.0	11.4	12.0	99.0	81.3	43.4	25.2	99.0	70.5	62.1	32.5	18:39:58 07/04/2014
68.5	62.0	15.6	16.1	99.0	77.2	68.0	11.4	12.0	99.0	81.3	43.4	25.2	99.0	68.5	62.0	32.5	18:48:23 07/04/2014
68.5	62.0	15.7	16.1	99.0	77.2	68.0	11.4	12.0	99.0	81.3	43.4	25.2	99.0	68.5	62.0	32.5	18:56:47 07/04/2014
67.7	62.4	15.6	16.1	99.0	76.3	68.5	11.3	11.8	99.0	76.0	43.4	26.0	99.0	67.7	62.4	31.8	19:05:12 07/04/2014
68.0	62.5	15.9	16.4	99.0	75.3	68.7	11.6	12.2	99.0	76.0	42.6	26.2	99.0	68.0	62.5	32.4	19:13:37 07/04/2014
68.6	62.5	16.1	16.6	99.0	76.1	68.7	11.9	12.4	99.0	75.6	42.5	26.5	99.0	68.6	62.5	32.4	19:22:02 07/04/2014
67.3	62.7	16.1	16.7	99.0	74.7	68.2	12.1	12.5	99.0	75.0	44.1	26.7	99.0	67.3	62.7	31.8	19:30:26 07/04/2014
65.6	63.0	16.1	16.7	99.0	73.3	69.2	12.1	12.5	99.0	74.5	43.5	26.7	99.0	65.6	63.0	31.8	19:38:51 07/04/2014
66.5	62.5	16.4	16.8	99.0	76.0	68.5	12.3	12.8	99.0	73.0	41.7	26.8	99.0	66.5	62.5	32.5	19:47:16 07/04/2014
66.5	62.5	16.4	16.8	99.0	76.0	68.5	12.3	12.8	99.0	73.0	41.7	26.8	99.0	66.5	62.5	32.5	19:55:41 07/04/2014
66.2	62.9	16.5	17.1	99.0	76.0	69.0	12.5	13.0	99.0	74.1	41.2	27.0	99.0	66.2	62.9	32.8	20:04:06 07/04/2014
69.0	62.8	16.7	17.2	99.0	75.6	69.0	12.7	13.0	99.0	74.0	41.7	27.1	99.0	69.0	62.8	32.9	20:12:30 07/04/2014
66.3	63.5	17.0	17.2	99.0	73.1	69.4	12.9	13.1	99.0	74.1	42.1	27.2	99.0	66.3	63.5	32.8	20:20:55 07/04/2014
66.1	63.3	17.1	17.3	99.0	75.1	70.8	12.9	13.2	99.0	74.7	41.0	27.1	99.0	66.1	63.3	32.6	20:29:20 07/04/2014
66.1	63.3	17.2	17.4	99.0	72.7	70.8	13.2	13.5	99.0	70.5	41.0	27.3	99.0	66.1	63.3	32.6	20:37:45 07/04/2014
65.3	62.3	17.2	17.3	99.0	74.9	72.6	13.5	14.0	99.0	70.0	40.4	27.5	99.0	65.3	62.3	33.0	20:46:10 07/04/2014
64.5	64.0	17.0	17.1	99.0	72.8	72.2	13.4	14.8	99.0	77.8	42.9	28.5	99.0	64.5	64.0	34.0	20:54:26 07/04/2014
64.5	64.0	17.0	17.0	99.0	78.2	72.8	14.7	15.0	99.0	74.0	42.4	27.4	99.0	64.5	64.0	33.0	21:02:59 07/04/2014
66.3	64.1	16.4	17.1	99.0	78.1	66.2	15.0	15.5	99.0	68.7	41.6	27.4	99.0	66.3	64.1	31.1	21:11:24 07/04/2014
68.6	64.4	16.7	17.4	99.0	78.3	65.1	15.6	16.3	99.0	67.4	44.2	27.8	99.0	68.6	64.4	31.1	21:19:49 07/04/2014
71.1	64.6	17.1	17.9	99.0	82.0	65.2	16.2	17.1	99.0	67.0	44.8	27.9	99.0	71.1	64.6	32.4	21:28:13 07/04/2014
69.4	64.3	17.4	18.2	99.0	77.8	64.9	16.5	17.6	99.0	66.4	44.0	28.0	99.0	69.4	64.3	32.6	21:36:38 07/04/2014
69.1	65.1	17.5	18.3	99.0	76.5	65.5	16.8	17.9	99.0	66.7	45.7	28.0	99.0	69.1	65.1	32.3	21:45:03 07/04/2014
69.3	64.8	17.7	18.6	99.0	75.4	65.3	17.1	18.2	99.0	67.0	44.4	28.0	99.0	69.3	64.8	32.5	21:53:28 07/04/2014
72.3	65.3	18.6	19.2	99.0	77.8	68.4	17.5	18.7	99.0	71.6	50.4	30.7	99.0	72.3	65.3	33.0	22:01:47 07/04/2014
72.3	65.3	18.6	19.2	99.0	81.2	65.7	18.0	19.2	99.0	70.8	51.3	27.6	99.0	72.3	65.3	33.1	22:10:17 07/04/2014
77.1	65.2	18.8	19.5	99.0	86.0	66.9	18.5	19.7	99.0	83.7	58.6	27.1	99.0	77.1	65.2	33.1	22:18:50 07/04/2014
75.0	61.6	19.0	19.2	99.0	82.9	62.1	18.7	19.2	99.0					75.0	61.6	20.4	22:36:14 07/04/2014
67.9	61.9	18.0	18.4	99.0	71.3	61.8	17.0	17.5	99.0					67.9	61.9	18.4	22:54:22 07/04/2014
66.5	62.0	17.8	18.3	99.0	69.1	61.7	16.5	17.1	99.0					66.5	62.0	18.0	22:53:46 07/04/2014
65.2	62.3	17.7	18.1	99.0	66.5	61.9	16.2	16.8	99.0					65.2	62.3	17.7	23:02:11 07/04/2014
62.5	61.7	17.8	18.1	99.0	63.1	61.1	16.1	16.7	99.0					62.5	61.7	17.8	23:13:25 07/04/2014
58.2	58.6	17.0	16.7	99.0	60.9	60.3	16.7	16.7	99.0					58.2	58.6	17.0	23:33:57 07/04/2014
58.3	59.5	15.9	15.8	99.0	67.6	61.7	16.0	16.7	99.0					58.3	59.5	15.8	23:42:22 07/04/2014
55.9	59.4	15.5	15.2	99.0	65.5	61.0	15.9	16.5	99.0					55.9	59.4	15.5	23:50:47 07/04/2014
54.4	59.4	15.3	14.9	99.0	63.9	61.0	15.7	16.2	99.0					54.4	59.4	15.3	23:58:23 07/04/2014
54.1	59.5	15.1	14.8	99.0	63.8	61.0	15.7	16.0	99.0					54.1	59.5	15.1	00:07:36 08/04/2014
56.0	60.8	15.1	15.0	99.0	66.6	61.0	16.0	16.5	99.0					56.0	60.8	15.1	00:16:01 08/04/2014
52.8	61.0	15.6	15.5	99.0	61.1	60.4	15.8	16.3	99.0					52.8			

Tabela 5 - Dados do sistema de aquisição do dia 28/04

Silo A - Tratamento					Silo C - Testemunha					Silo C - Tratamento					Silo D - Testemunha					Sistema	
Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Hora	Data
99,0	59,4	10,4	10,6	10,1	45,9	51,0	5,9	8,0	11,0	97,3	49,2	8,0	11,3	8,5	96,7	45,8	9,6	15,5	17,2	09:08:28	28/04/2014
99,0	70,7	10,9	8,2	10,9	99,0	50,0	17,1	18,0	25,1	98,3	58,0	9,3	9,1	9,2	99,0	44,7	16,8	17,9	20,6	09:16:51	28/04/2014
99,0	73,6	9,3	9,7	14,2	99,0	49,0	18,2	18,8	27,0	98,2	61,6	7,7	10,3	13,1	99,0	43,4	17,9	18,5	24,3	09:25:16	28/04/2014
99,0	73,3	10,2	12,0	16,5	71,6	49,4	18,6	19,2	27,5	99,0	61,9	10,0	12,0	15,5	99,0	42,9	18,4	18,9	26,1	09:33:41	28/04/2014
99,0	72,0	12,3	13,2	17,8	45,9	49,2	19,1	19,7	28,1	99,0	61,6	11,9	13,0	17,0	99,0	42,9	18,8	19,4	26,9	09:42:06	28/04/2014
99,0	71,7	13,6	13,9	18,8	46,9	48,8	19,6	20,2	28,7	99,0	60,9	12,9	13,7	18,0	99,0	42,3	19,1	19,7	27,6	09:50:31	28/04/2014
99,0	71,1	14,3	14,4	19,5	48,5	47,7	20,1	20,8	29,3	99,0	60,1	13,4	14,2	18,6	99,0	41,4	19,5	20,1	28,1	09:58:55	28/04/2014
99,0	70,4	14,8	14,7	20,0	49,0	47,1	20,4	21,6	29,8	99,0	59,5	13,7	14,5	19,0	99,0	41,0	19,8	20,8	28,5	10:07:20	28/04/2014
99,0	70,1	15,1	15,1	20,5	49,2	46,8	20,7	22,6	30,2	99,0	58,9	13,9	14,9	19,3	99,0	40,3	20,0	22,2	29,0	10:15:45	28/04/2014
99,0	69,3	15,4	15,3	20,9	49,3	46,4	20,9	23,6	30,4	99,0	58,3	14,0	15,2	19,5	99,0	40,2	20,2	23,5	29,3	10:24:10	28/04/2014
99,0	69,5	15,6	15,5	21,2	49,4	46,3	21,1	24,4	30,5	99,0	58,4	14,1	15,5	19,6	99,0	40,0	20,4	24,4	29,4	10:32:35	28/04/2014
99,0	68,8	15,8	15,6	21,2	49,6	46,1	21,2	25,1	30,6	99,0	58,1	14,2	15,9	19,8	99,0	39,9	20,5	25,1	29,7	10:40:59	28/04/2014
99,0	68,8	15,8	15,6	21,4	49,6	46,1	21,2	25,6	30,8	99,0	58,0	14,3	16,3	19,9	99,0	39,7	20,6	25,6	29,9	10:49:24	28/04/2014
96,7	69,6	15,8	15,8	21,3	49,7	47,3	21,3	25,8	30,3	86,0	60,1	14,3	16,6	19,9	99,0	40,8	20,7	26,0	29,9	10:57:49	28/04/2014
94,0	75,4	15,8	15,7	21,2	96,4	48,5	20,9	25,7	29,4	78,9	63,2	14,3	16,9	20,0	99,0	41,4	20,6	26,2	29,5	11:06:14	28/04/2014
95,8	78,1	15,9	15,8	21,4	99,0	47,6	20,5	25,8	29,7	77,7	66,2	14,4	17,1	20,1	97,5	40,3	20,6	26,5	29,7	11:14:39	28/04/2014
94,6	76,8	15,9	15,9	21,4	99,0	46,8	20,6	25,8	29,5	77,8	66,7	14,4	17,4	20,2	90,7	39,6	20,6	26,6	29,8	11:23:03	28/04/2014
97,5	62,6	16,1	16,1	19,3	99,0	44,0	20,3	25,8	30,1	88,1	55,0	14,7	17,3	18,5	97,6	37,3	20,3	26,6	29,6	11:31:34	28/04/2014
99,0	63,1	15,6	11,8	14,1	99,0	42,7	20,3	26,0	30,3	95,3	51,5	12,7	13,5	13,3	99,0	36,2	20,1	26,6	29,9	11:40:11	28/04/2014
98,4	70,0	11,6	9,9	15,2	99,0	43,2	20,2	26,2	29,9	90,9	60,2	9,1	12,5	14,9	99,0	36,6	20,0	26,8	29,7	11:48:36	28/04/2014
98,9	70,3	10,3	11,7	17,2	99,0	43,5	20,2	26,4	30,0	96,9	61,0	10,7	14,5	17,6	99,0	36,8	20,2	27,1	29,9	11:57:01	28/04/2014
99,0	70,4	11,7	13,1	18,4	99,0	43,6	20,6	26,8	30,3	99,0	60,4	12,7	15,7	18,7	99,0	36,5	20,7	27,5	30,3	12:05:26	28/04/2014
99,0	71,1	12,9	14,1	19,3	99,0	44,2	21,1	27,2	30,5	99,0	60,8	13,4	16,4	19,1	99,0	37,4	21,2	27,9	30,6	12:13:50	28/04/2014
99,0	71,8	13,8	14,8	19,8	99,0	44,1	21,5	27,4	30,7	99,0	61,3	13,8	16,8	19,4	98,1	37,3	21,6	28,2	30,5	12:22:15	28/04/2014
99,0	71,3	14,4	15,4	20,4	99,0	43,0	22,0	27,9	31,7	99,0	61,1	14,5	17,5	20,5	97,3	36,1	22,1	28,6	31,4	12:30:40	28/04/2014
99,0	60,4	14,9	15,4	18,7	99,0	42,1	22,6	28,3	31,9	98,9	52,6	15,1	17,5	19,1	96,5	35,3	22,7	29,9	31,8	12:39:05	28/04/2014
99,0	68,5	13,8	12,1	15,4	99,0	42,1	22,6	28,4	31,4	94,1	58,9	12,8	15,6	16,6	94,6	35,5	22,7	29,2	31,4	12:47:29	28/04/2014
98,5	71,6	11,4	12,7	17,9	99,0	41,6	22,6	28,5	31,4	95,2	61,0	12,6	16,4	18,5	92,0	35,2	22,8	29,3	31,3	12:55:54	28/04/2014
99,0	60,3	12,4	14,4	17,9	99,0	40,2	22,9	28,6	31,9	97,0	51,9	14,1	17,0	18,5	90,7	33,8	23,2	29,5	31,8	13:04:19	28/04/2014
98,6	64,3	12,7	11,7	14,2	99,0	40,4	22,9	28,7	31,3	89,8	55,1	12,4	15,1	15,0	88,9	34,2	23,2	29,5	31,3	13:12:44	28/04/2014
91,1	71,5	10,4	11,7	16,6	99,0	39,6	23,0	28,8	31,6	88,1	60,4	11,6	15,7	17,3	87,3	34,0	23,4	29,7	31,3	13:21:09	28/04/2014
83,5	68,3	10,6	13,6	18,6	98,8	41,5	23,2	29,2	31,8	80,6	61,2	13,2	17,1	19,4	86,0	34,3	23,9	30,0	32,0	13:29:33	28/04/2014
75,9	68,6	10,7	13,6	18,7	99,0	42,0	23,9	29,8	31,9	68,2	64,6	13,3	17,7	19,8	81,6	34,8	24,4	30,5	32,5	13:37:58	28/04/2014
95,4	56,1	12,1	13,5	16,3	99,0	39,7	24,2	29,6	31,8	86,5	47,7	14,0	16,8	16,9	76,1	38,6	24,7	30,5	32,1	13:46:23	28/04/2014
98,5	58,3	11,4	10,3	12,5	99,0	40,2	24,0	29,3	30,9	87,3	49,4	11,2	13,8	12,8	79,3	34,0	24,6	30,2	31,1	13:54:48	28/04/2014
94,0	60,1	8,8	9,1	12,2	99,0	40,0	24,0	29,0	30,5	85,3	50,7	9,5	12,9	12,5	77,9	33,9	24,6	29,9	30,8	14:03:13	28/04/2014
93,4	65,3	7,8	9,5	13,2	99,0	40,3	24,1	28,7	30,3	85,1	57,5	9,5	13,2	13,8	76,0	34,2	24,8	29,7	30,6	14:11:37	28/04/2014
95,8	71,1	8,5	11,2	15,6	99,0	40,1	24,3	28,8	30,7	88,6	60,5	11,4	15,0	16,6	74,7	33,8	25,2	29,9	31,2	14:20:02	28/04/2014
98,9	69,6	10,6	13,8	18,5	99,0	39,8	24,8	29,3	31,6	92,1	58,7	13,7	16,6	18,8	74,1	33,6	25,7	30,3	32,0	14:28:27	28/04/2014
99,0	57,2	12,7	13,7	15,7	98,5	39,0	25,2	29,6	31,6	88,0	48,2	14,1	16,1	15,7	66,0	33,0	25,7	30,6	31,9	14:36:52	28/04/2014
98,3	59,8	11,1	10,6	12,3	98,7	39,0	25,1	29,7	31,0	81,0	49,7	11,5	14,0	12,7	70,6	33,0	25,8	30,6	31,1	14:45:17	28/04/2014
93,0	65,6	8,8	9,9	13,0	96,8	39,3	25,1	29,5	30,7	79,2	55,2	10,4	13,6	13,4	69,3	33,2	25,8	30,4	30,8	14:53:41	28/04/2014
94,0	71,7	8,8	11,6	15,8	95,9	39,2	25,4	29,5	31,1	78,6	60,1	11,5	15,1	16,5	58,9	38,9	25,8	30,4	30,9	15:02:06	28/04/2014
96,5	68,7	10,9	14,1	18,4	89,2	39,3	25,5	29,9	31,8	81,1	58,4	14,0	16,9	19,0	59,0	43,5	25,7	30,5	30,9	15:10:31	28/04/2014
95,3	61,1	13,1	15,1	18,0	92,7	39,3	25,9	30,5	32,0	86,4	50,8	15,0	17,1	17,8	59,5	44,2	25,7	30,5	30,8	15:18:56	28/04/2014
94,2	60,2	12,3	11,7	13,1	91,0	39,9	26,1	30,5	31,2	76,8	49,5	12,6	14,9	13,3	61,3	45,7	25,7	30,6	30,7	15:27:20	28/04/2014
90,6	60,9	9,5	10,3	12,5	87,7	39,8	26,2	30,2	30,9	72,4	50,3	10,9	13,8	12,7	62,9	46,3	25,7	30,6	30,6	15:35:45	28/04/2014
86,4	65,4	8,7	10,4	13,2	87,4	40,0	26,3	30,0	30,8	71,9	56,7	11,0	14,0	14,5	62,1	46,8	25,7	30,5	30,4	15:44:10	28/04/2014
89,2	71,6	9,3	11,8	15,4	87,3	40,1	26,6	30,1	31,0	79,1	60,2	12,8	15,6	16,9	62,7	47,8	25,6	30,5	30,2	15:52:35	28/04/2014
96,7	70,5	11,4	14,2	18,2	86,9	39,8	26,9	30,4	31,7	84,2	58,6	14,8	17,2	19,1	64,6	47,7	25,6	30,4	30,0	16:01:00	28/04/2014
98,9	58,6	13,1	13,9	15,6	82,3	39,2	26,8	30,5	31,6	80,8	49,1	15,0	16,6	16,1	63,3	48,1	25,6	30,3	29,8	16:09:24	28/04/2014
92,1	63,5	11,2	11,2	12,8	81,7	39,8	26,4	30,4	30,6	71,8	54,5	12,6	14,8	13,6	62,5	49,0	25,5	30,2	29,6	16:17:49	28/04/2014
87,2	71,9	9,7	11,3	14,4	80,7	40,2	26,5	30,0	30,3	73,4	60,3	12,6	15,3	15,8	62,7	49,1	25,5	30,0	29,3	16:26:14	28/04/2014
89,6	70,4	10,6	13,4	17,1	79,3	41,8	26,1	30,0	30,8	78,6	60,0	14,4	16,9	18,4	64,2	48,7	25,4	29,9	29,1	16:34:44	28/04/2014
83,3	64,9	11,1	13,9	17,4	81,8	43,9	26,7	30,5	30,9	74,6	55,6	14,8	17,5	18,4	65,1	47,6	25,4	29,7	28,9	16:43:25	28/04/2014
98,8	58,3	12,5	12,8	14,4	83,8	44,9	26,5	30,1	30,2	78,4	49,3										

Tabela 5 - Dados do sistema de aquisição do dia 28/04 – Continuação

Silo A - Tratamento					Silo C - Testemunha					Silo C - Tratamento					Silo D - Testemunha					Sistema	
Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Umid. Topo (%)	Umid. Fundo (%)	Temp. topo (°C)	Temp. meio (°C)	Temp. fundo (°C)	Hora	Data
90,4	61,7	11,7	11,3	13,0						71,2	51,3	11,7	13,4	12,0						22:36:46	28/04/2014
81,0	72,1	10,1	10,5	12,8						63,8	59,1	10,2	12,3	11,6						22:45:11	28/04/2014
84,7	72,8	10,8	13,0	16,2						69,4	61,2	11,8	13,7	14,5						22:53:36	28/04/2014
94,7	70,6	13,1	14,6	18,0						74,8	60,4	13,6	15,0	16,3						23:02:01	28/04/2014
97,0	70,0	14,2	15,3	18,7						76,0	59,8	14,5	15,8	17,0						23:10:25	28/04/2014
97,0	69,1	14,7	16,0	19,2						75,9	59,0	15,1	16,4	17,4						23:18:50	28/04/2014
97,0	68,9	15,1	16,4	19,5						74,9	58,2	15,6	16,8	17,7						23:27:15	28/04/2014
95,7	68,4	15,4	16,8	19,7						73,4	58,0	15,8	16,9	17,6						23:35:40	28/04/2014
93,5	67,2	15,8	17,0	19,8						74,0	57,0	16,1	17,1	18,0						23:43:31	28/04/2014
96,4	62,9	15,2	13,4	14,5						79,4	52,6	14,4	14,6	14,6						09:07:08	29/04/2014
84,3	74,7	11,5	11,0	13,2						70,4	60,4	11,4	12,9	12,6						09:15:33	29/04/2014
86,4	75,9	10,9	12,7	15,2						72,6	62,6	11,8	13,8	14,5						09:23:58	29/04/2014
94,4	73,2	12,5	14,0	17,0						76,9	61,1	13,6	15,0	16,5						09:32:22	29/04/2014
97,8	72,5	13,6	14,8	18,0						77,6	60,4	14,6	15,9	17,3						09:40:47	29/04/2014
99,0	72,1	14,3	15,5	18,7						77,0	59,8	15,2	16,5	17,8						09:49:12	29/04/2014
98,6	71,5	14,8	16,1	19,2						76,3	58,9	15,7	17,0	18,2						09:57:37	29/04/2014
98,0	70,9	15,2	16,7	19,8						75,4	58,6	16,2	17,4	18,6						10:06:02	29/04/2014
93,9	69,8	15,6	17,0	20,0						76,5	58,5	16,5	17,6	18,7						10:14:26	29/04/2014
86,9	71,8	15,6	17,0	20,1						77,1	61,6	16,5	17,6	18,7						10:22:51	29/04/2014
92,7	62,4	15,6	16,0	17,5						74,1	54,1	16,3	17,1	17,2						10:31:16	29/04/2014
82,5	62,9	13,2	11,9	12,0						64,2	52,9	13,9	14,7	12,8						10:39:41	29/04/2014
73,8	71,3	10,4	10,8	12,7						59,9	58,8	12,2	13,7	13,1						10:48:06	29/04/2014
74,3	77,0	10,9	13,6	16,8						66,2	62,3	13,8	15,6	16,7						10:56:30	29/04/2014
85,2	74,1	13,4	16,2	19,6						75,0	61,5	15,6	16,9	18,1						11:04:55	29/04/2014
74,3	73,4	13,5	16,3	19,7						70,4	62,5	15,7	17,1	18,2						11:13:20	29/04/2014
78,6	67,3	13,9	16,3	19,4						69,9	58,3	15,9	17,3	18,1						11:21:45	29/04/2014
87,4	61,9	14,5	13,8	15,0						67,2	52,1	14,7	15,6	14,2						11:30:09	29/04/2014
73,8	64,9	12,1	11,5	12,8						59,3	54,6	12,5	14,0	12,1						11:38:34	29/04/2014
70,2	67,6	10,8	11,4	13,2						58,3	56,5	12,0	13,7	12,6						11:46:59	29/04/2014
72,4	72,3	11,2	12,6	15,4						61,1	60,7	12,9	14,6	14,9						11:55:24	29/04/2014
80,8	72,8	13,2	15,0	18,2						68,7	61,4	15,1	16,6	17,9						12:03:49	29/04/2014
86,7	71,7	15,2	16,5	19,8						72,8	61,5	16,8	18,2	19,7						12:12:13	29/04/2014
76,0	65,3	15,7	16,9	19,9						69,0	58,4	17,3	18,7	19,9						12:20:38	29/04/2014
80,0	59,0	15,0	13,8	14,3						66,3	51,2	16,2	17,3	16,3						12:29:03	29/04/2014
67,0	61,5	11,9	11,2	12,2						58,8	52,9	14,4	16,0	14,8						12:37:28	29/04/2014
64,2	62,6	10,6	11,0	12,7						58,1	53,8	14,3	15,9	15,3						12:45:53	29/04/2014
65,3	68,6	10,8	11,7	14,1						59,7	57,4	14,8	16,6	16,6						12:54:17	29/04/2014
70,9	70,8	12,2	13,7	16,5						64,0	59,7	16,4	18,0	18,8						13:02:42	29/04/2014
75,9	72,8	14,1	15,4	18,3						67,3	60,7	17,9	19,4	20,5						13:11:07	29/04/2014
83,3	72,9	15,7	16,8	19,8						70,3	60,1	19,1	20,4	21,7						13:19:32	29/04/2014
85,7	73,2	16,8	17,7	20,7						70,9	60,2	19,8	21,1	22,2						13:27:56	29/04/2014
86,6	73,0	17,5	18,5	21,4						70,2	59,8	20,3	21,6	22,4						13:36:21	29/04/2014
87,4	68,4	18,1	18,9	21,4						69,7	56,1	20,8	21,8	22,4						13:44:46	29/04/2014
78,8	65,6	17,0	16,1	16,8						59,7	53,2	18,8	19,5	17,7						13:53:11	29/04/2014
71,9	72,7	15,0	15,3	16,8						55,6	59,8	17,3	18,6	17,2						14:01:36	29/04/2014
75,5	74,7	15,5	16,6	19,0						59,5	61,7	18,0	19,2	19,2						14:10:00	29/04/2014
81,8	69,5	17,2	17,8	20,5						64,8	58,0	19,5	20,3	21,3						14:18:25	29/04/2014
71,5	62,8	16,8	15,4	16,2						57,8	53,2	18,2	18,8	17,4						14:26:50	29/04/2014
61,0	71,2	14,5	14,2	15,9						52,3	58,5	16,3	17,8	16,2						14:35:15	29/04/2014
67,5	73,7	14,9	16,1	18,8						57,0	61,7	17,2	18,7	18,8						14:43:40	29/04/2014
75,4	68,5	16,9	17,5	20,3						63,5	57,5	18,9	20,0	21,1						14:52:04	29/04/2014
70,9	63,9	16,6	15,4	16,5						59,9	51,7	18,3	18,9	17,7						15:00:29	29/04/2014
63,1	64,8	14,6	14,4	15,4																15:08:54	29/04/2014
62,7	62,5	13,9	13,8	15,2																15:17:19	29/04/2014
58,8	64,9	13,1	11,5	12,4																15:25:44	29/04/2014
52,8	56,7	12,0	11,2	11,1																15:34:08	29/04/2014
51,0	59,8	11,1	11,0	13,0																15:42:33	29/04/2014
51,4	64,7	10,9	10,1	12,0																15:50:58	29/04/2014
53,0	63,4	10,9	10,0	11,1																15:59:23	29/04/2014
58,6	57,4	10,7	10,6	11,2																16:07:47	29/04/2014
56,2	65,2	10,6	10,7	14,0																16:16:12	29/04/2014
63,6	55,3	12,5	13,3	16,4																16:24:37	29/04/2014
64,4	52,8	13,0	14,0	16,5																16:33:02	29/04/2014
69,7	70,7	12,0	10,8	11,4																16:41:27	29/04/2014
55,9	48,8	10,9	11,3	13,7																16:49:51	29/04/2014
53,6	47,4	10,2	9,4	9,9																16:58:16	29/04/2014
78,2	49,2	8,7	8,3	10,1																17:06:41	29/04/2014
71,0	47,4	8,7	8,5	10,9																17:15:06	29/04/2014
55,4	47,1	9,5	10,9	13,3																17:23:31	29/04/2014
52,1	52,6	9,4	9,1	10,3																17:31:55	29/04/2014
51,5	59,3	9,5	11,2	14,0																17:40:20	29/04/2014
59,7	59,0	12,3	13,9	16,8																17:48:45	29/04/2014
64,1	57,7	14,1	15,4	18,3																17:57:10	29/04/2014
77,4	58,1	14,9	16,2	19,0																18:05:34	29/04/2014
68,9	49,4	14,9	15,3	16,4																18:13:59	29/04/2014
55,0	50,2	12,3	10,8	10,4																18:22:24	29/04/2014
51,7	59																				

4.4 –Análise gráfica das umidades relativas do ar de secagem

A seguir são apresentadas as Figuras de 11 a 18, que mostram os gráficos de umidade relativa do ar secagem medidas na entrada e na saída do ar. Para efeito de comparação com a umidade do grão, utilizaram-se os valores adquiridos pelo sistema nos horários de amostragem do produto.

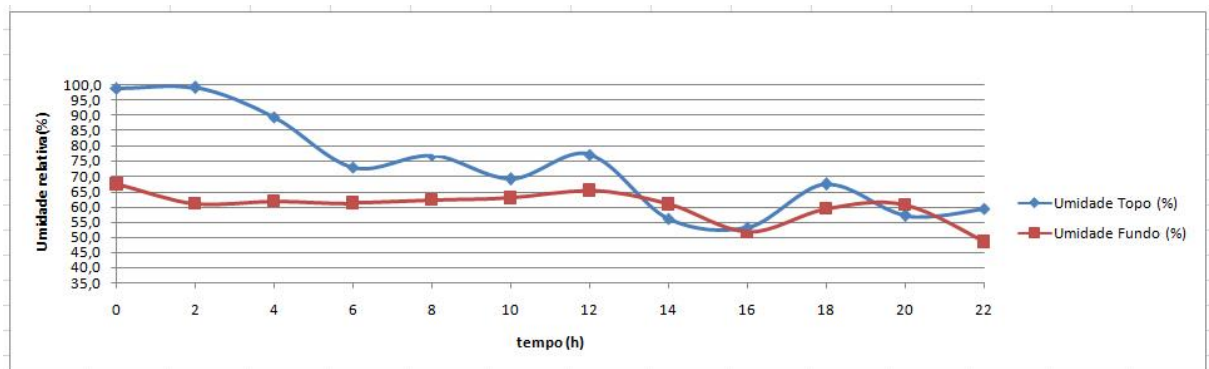


Figura 11 - Umidade relativa do ar de secagem - secador refrigerado A - 07/04

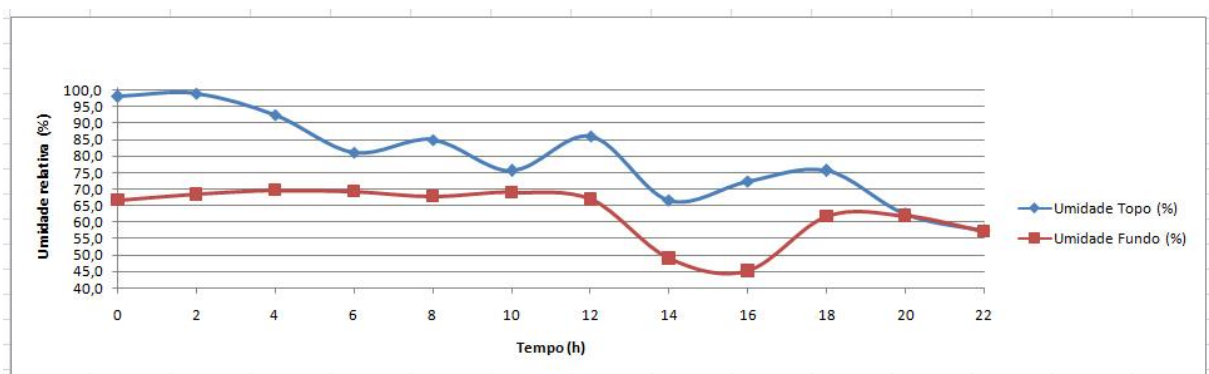


Figura 12 - Umidade relativa do ar de secagem - secador refrigerado B - 07/04

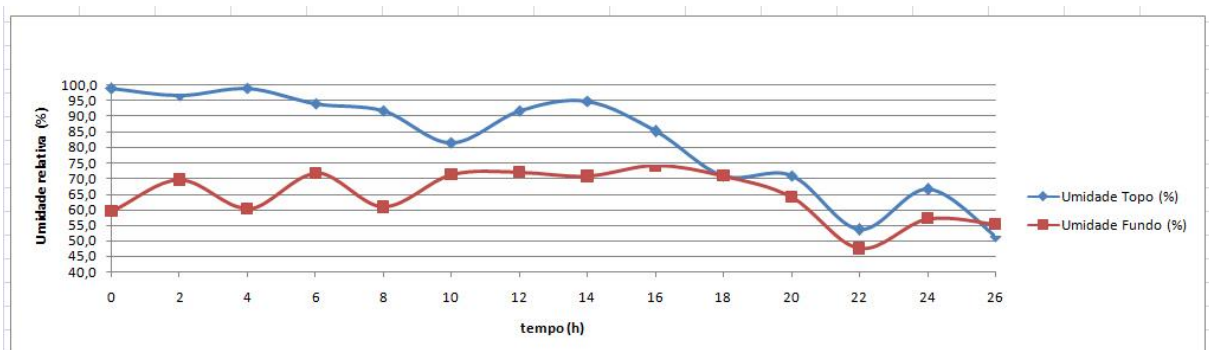


Figura 13 - Umidade relativa do ar de secagem - secador refrigerado A - 28/04

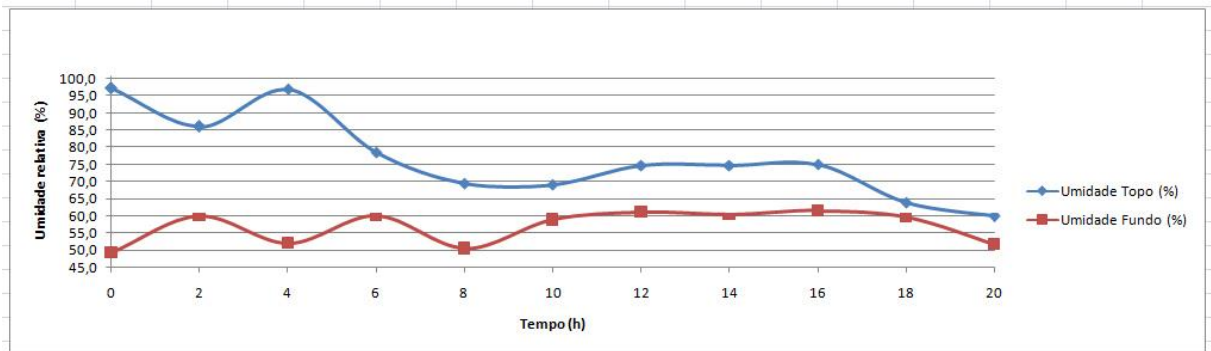


Figura 14 - Umidade relativa do ar de secagem - secador refrigerado C - 28/04

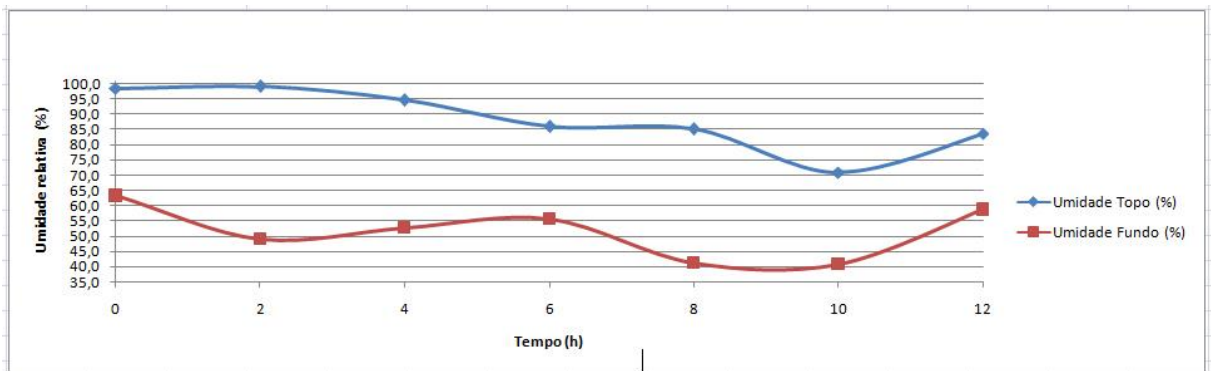


Figura 15 - Umidade relativa do ar de secagem - secador com ar ambiente C - 07/04

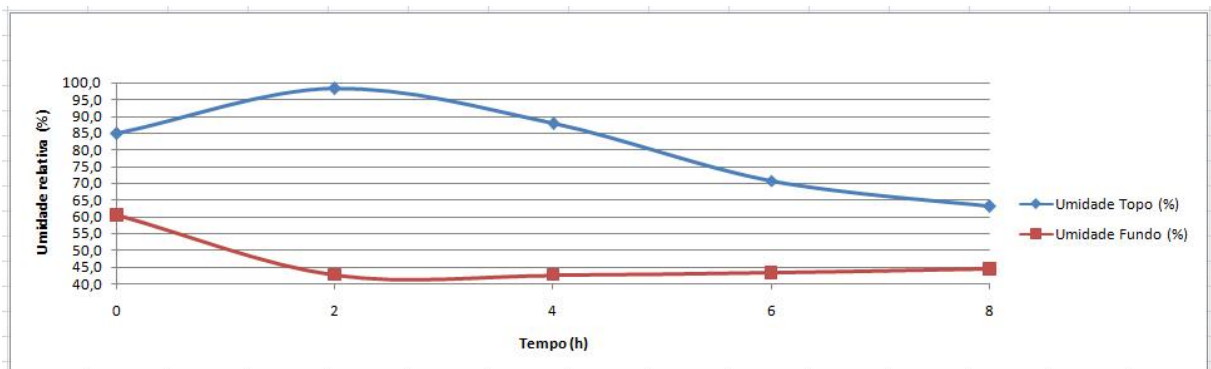


Figura 16 - Umidade relativa do ar de secagem - secador com ar ambiente D - 07/04

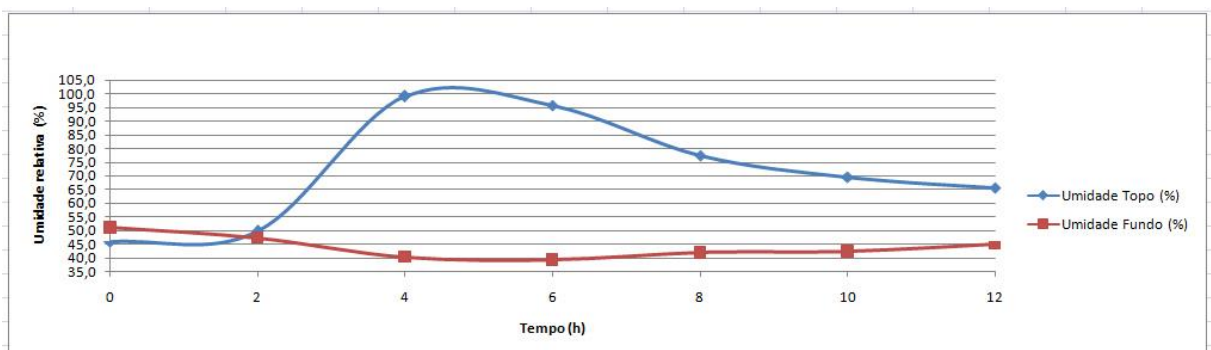


Figura 17 - Umidade relativa do ar de secagem - secador com ar ambiente B - 28/04

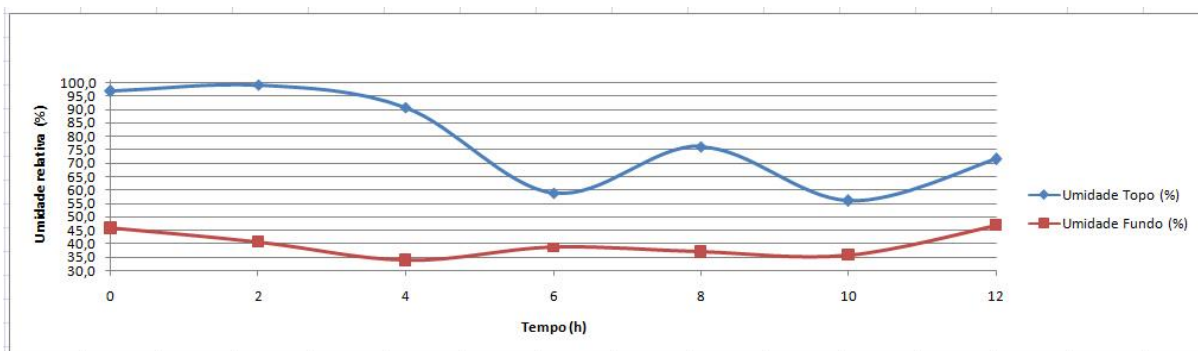


Figura 18 - Umidade relativa do ar de secagem - secador com ar ambiente D - 28/04

No secador A tratado com ar refrigerado dia 07/04 (Figura 11) ocorreu uma anomalia na 14ª amostragem na qual a umidade no topo do secador aparece inferior à umidade no fundo do secador. Essa anomalia foi, provavelmente, causada em um momento de degelo do trocador de calor no qual a entrada de ar era fechada, enquanto o degelo era realizado, e o topo do secador ficava exposto ao ar ambiente. Como o ar do fundo do secador ficava um determinado tempo, estático, em contato com o produto ele pode ter entrado em equilíbrio higroscópico com o produto enquanto o sensor do topo do secador estava em contato com o ar ambiente, uma vez que o topo do secador não foi fechado.

No gráfico da Figura 17, do secador com ar ambiente B no dia 28, observa-se também uma anomalia entre o intervalo compreendido entre o início e a quarta hora do processo de secagem. Essa anomalia foi consequência do rompimento do condutor elétrico que liga o sensor de umidade à placa de aquisição de dados, problema esse que foi solucionado sem necessidade de desligar o equipamento.

4.5 – Análise gráfica das condições do ar ambiente e do ar de secagem na saída do condicionado de ar

Nas Figuras 19 e 20 são apresentadas as umidades relativas do ambiente no qual foi conduzido o experimento e as temperaturas do ambiente e de saída do sistema de condicionamento de ar, nos dias dos experimentos.

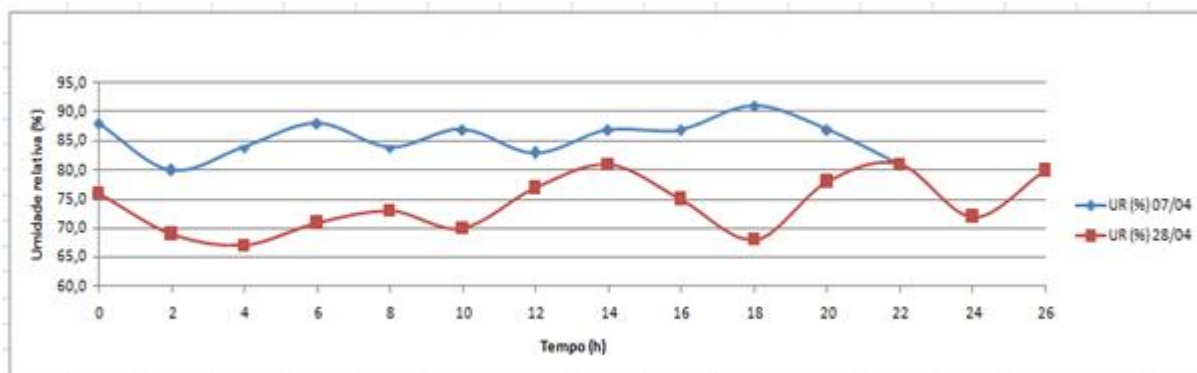


Figura 19 - Umidade relativas do ambiente nos dias do experimento

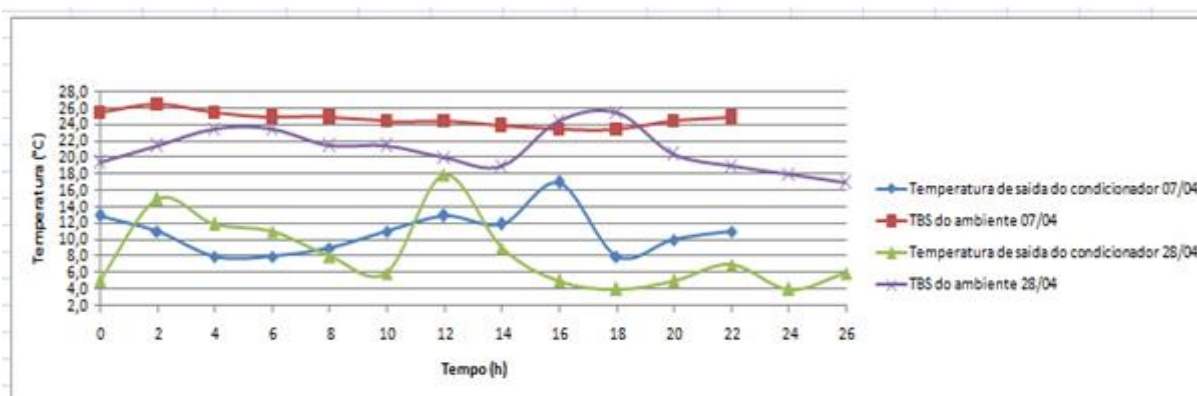


Figura 20 - Temperaturas do ambiente e de saída do condicionador de ar

O funcionamento contínuo do sistema de condicionamento de ar ocasionou o congelamento do trocador de calor interno, por várias vezes, sendo necessário realizar degelo com as mangueiras desconectadas dos secadores e com o condicionador na função ventilar, uma vez que este equipamento não possui ciclo de aquecimento. É provável que as oscilações ocorridas na umidade relativa do ar de entrada nos secadores refrigerados, principalmente no dia 28, quando foram realizados vários degelos, sejam decorrentes da variação de rendimento que o condicionador apresenta nas situações de trocador de calor saturado de gelo e limpo, como pode ser observado na Figura 20 com as temperaturas ambiente e de saída do condicionador de ar.

Em todas as repetições de secagem, seja com ar refrigerado ou com ar ambiente, a umidade relativa de saída do ar, no topo do secador, permaneceu próxima a 100% durante as primeiras horas de secagem. Fazendo a comparação das Figuras 11 a 18 que mostram os gráficos de umidade relativa do ar de secagem com as Figuras 3 a 10 que mostram os gráficos de umidade do produto, observa-se que o tempo, em cada secador, em que o ar permaneceu saturado coincide, aproximadamente, com o tempo no qual o produto da camada superior sofreu

acréscimo na umidade, uma vez que, conforme Saravia, Peres e Rizzo (2007, p.24), o produto realiza trocas com o ar até atingir o equilíbrio energético, térmico e hídrico.

4.6 – Análise gráfica da temperatura do ar de secagem

As Figuras 21 a 28 apresentam as temperaturas no fundo, meio e topo dos secadores, monitorados pelo sistema de aquisição de dados, bem como a temperatura de saída do condicionador de ar nos secadores tratados com ar refrigerado e a temperatura de bulbo seco do ambiente nos secadores tratados com ar ambiente.

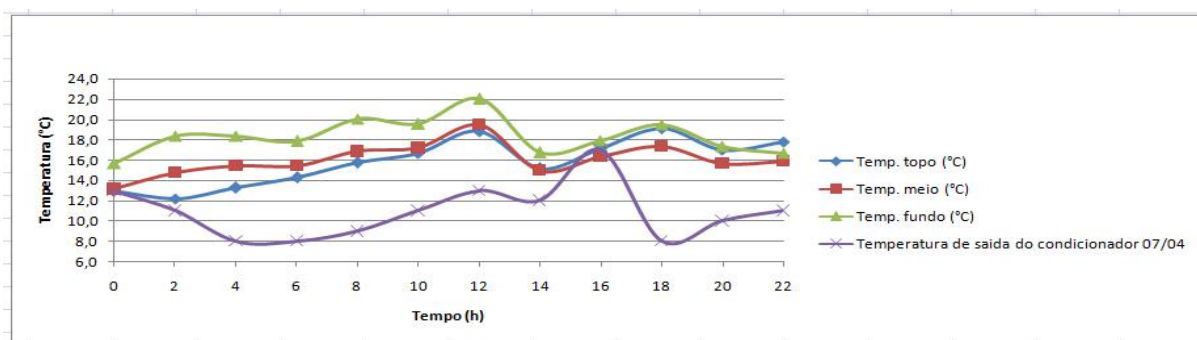


Figura 21 - Temperaturas do ar de secagem - secador refrigerado A - 07/04

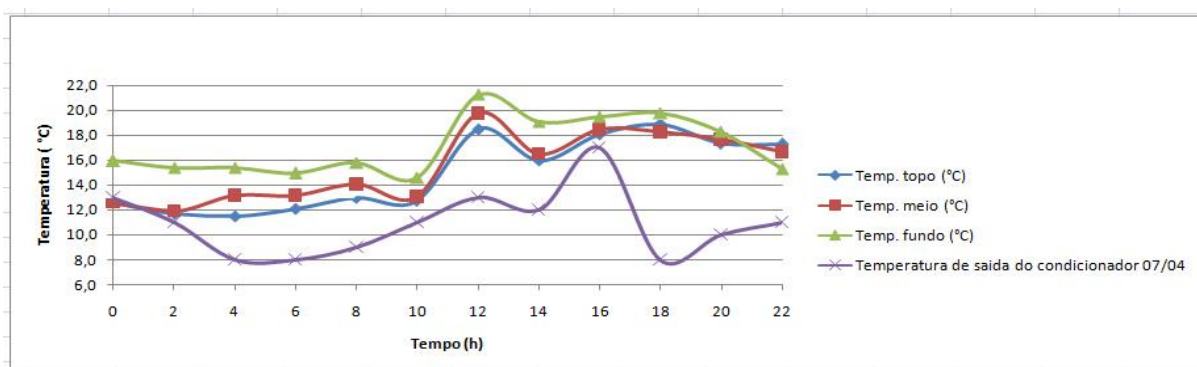


Figura 22 - Temperaturas do ar de secagem - secador refrigerado B - 07/04

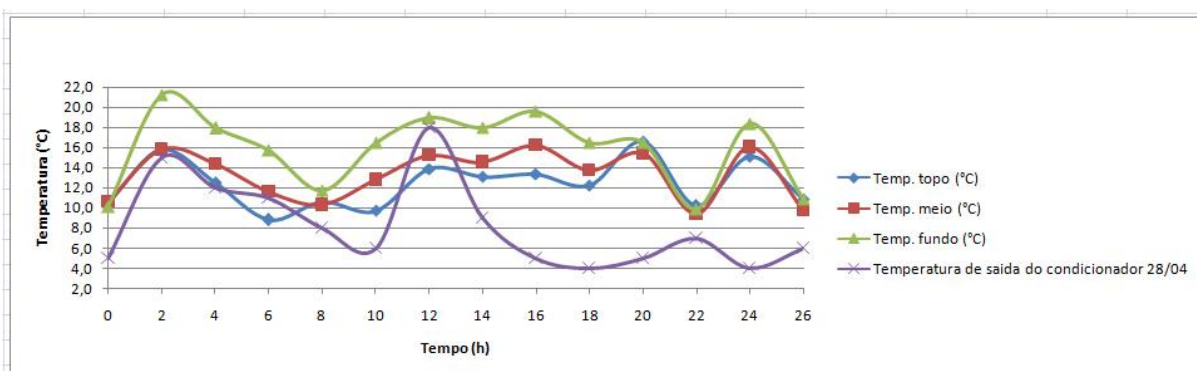


Figura 23 - Temperaturas do ar de secagem - secador refrigerado A - 28/04

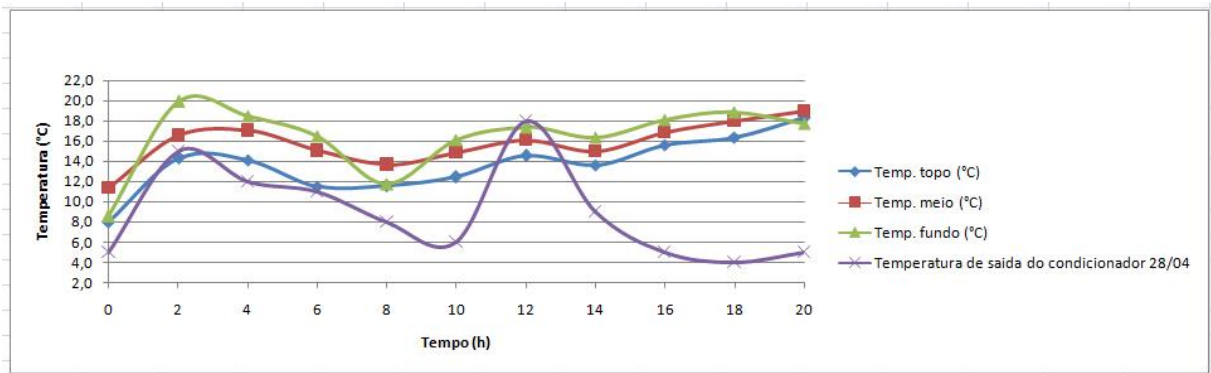


Figura 24 - Temperaturas do ar de secagem - secador refrigerado C - 28/04

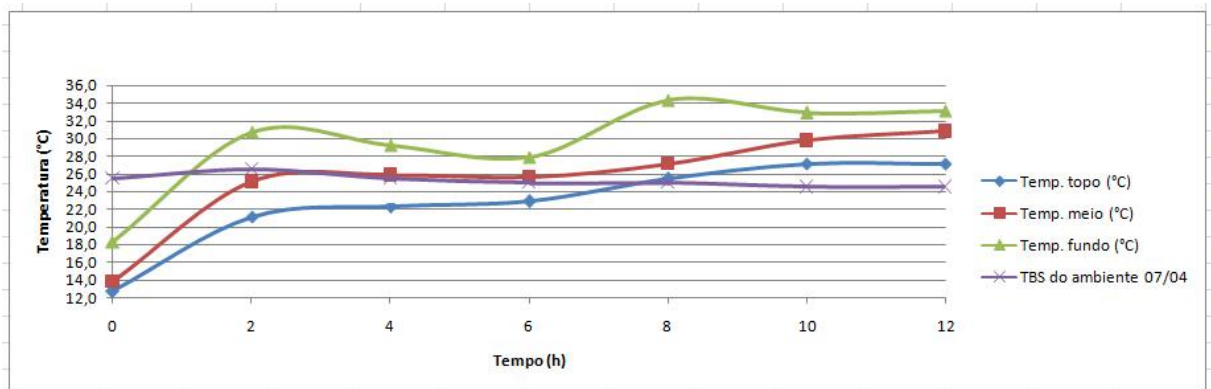


Figura 25 - Temperaturas do ar de secagem - secador com ar ambiente C - 07/04

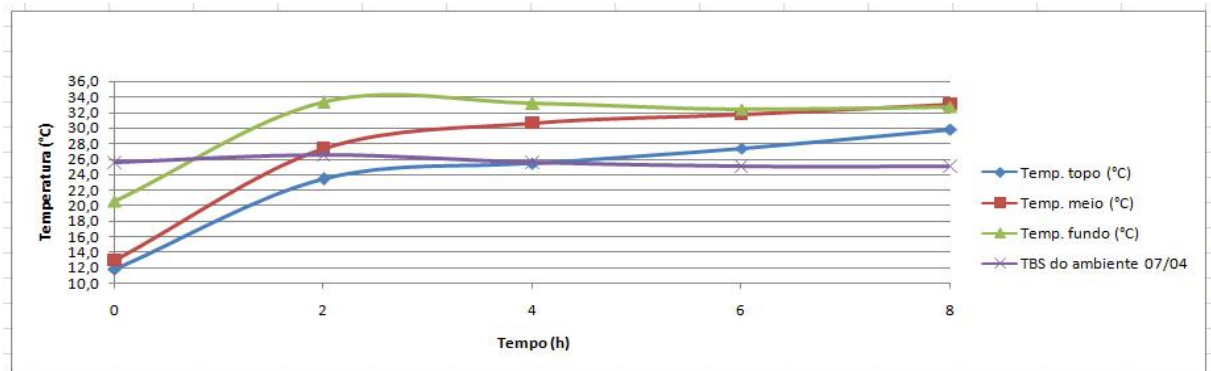


Figura 26 - Temperaturas do ar de secagem - secador com ar ambiente D - 07/04

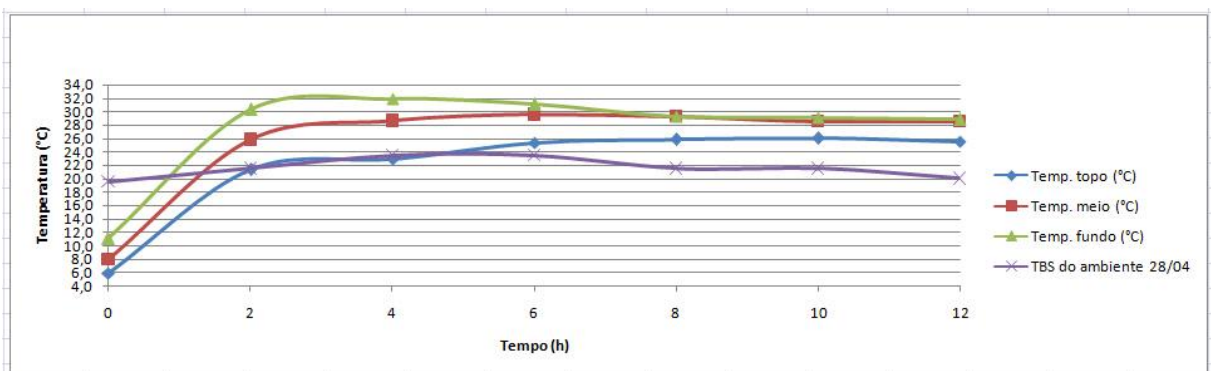


Figura 27 - Temperaturas do ar de secagem - secador com ar ambiente B - 28/04

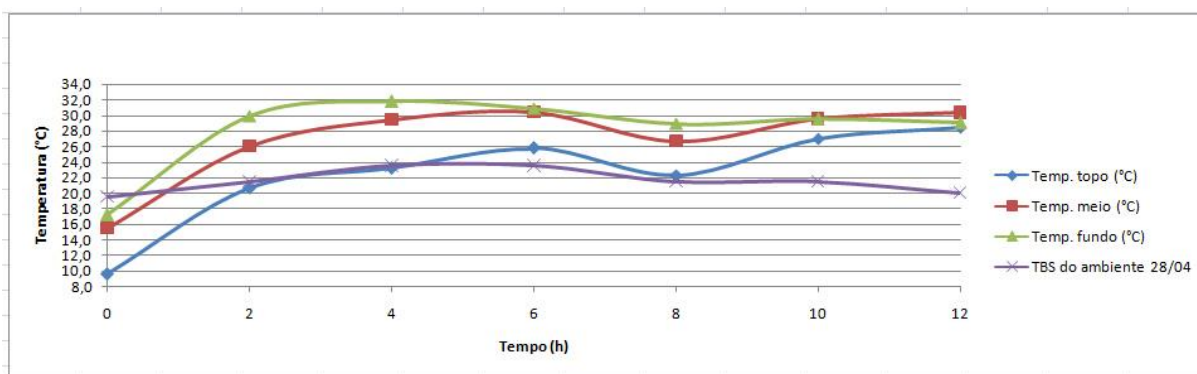


Figura 28 - Temperaturas do ar de secagem - secador com ar ambiente D - 28/04

Nos secadores tratados com ar ambiente, convém salientar que inicialmente a temperatura do ar de secagem apresenta-se inferior ao ar ambiente, mesmo na entrada, porque o produto foi armazenado por uma semana, sob refrigeração a $5\pm 2^{\circ}\text{C}$, e removido diretamente para os secadores e, portanto, absorveram calor até que as suas temperaturas entrassem em equilíbrio com o ar de secagem.

Nas Figuras 21 a 28, pode-se observar que a temperatura decresce à medida que se afasta da entrada, evidenciando a troca térmica que ocorre entre o produto e o ar e, que foi elucidado por Villela e Silva (1992 apud Garcia et. al, 2004, p. 605) ao destacarem, que o ar de secagem sofre uma queda de temperatura, uma vez que cede calor ao produto para proporcionar a evaporação da água contida na massa de produto. Observa-se, ainda, que nos secadores tratados com ar ambiente a temperatura de entrada do ar permaneceu acima da temperatura ambiente com um diferencial de aproximadamente 8°C e que nos secadores tratados com ar refrigerado a temperatura do ar de entrada permaneceu acima da temperatura de saída do condicionador de ar. Nesse último caso, o diferencial sofreu várias alterações, provavelmente em função dos diversos congelamentos que ocorreu no trocador de calor. É importante destacar que em todos os casos houve aquecimento do ar, provavelmente no ventilador centrífugo, conforme destacado por Rossi e Roa (1980 apud Rangel, Zimmer e Villela 1997, p. 1082) e que pode ter sido causado pela compressão adiabática do ar (HALLIDAY, RESNIK e WALKER, 2009, p.198) e pela geração de calor no motor do soprador devido ao efeito Joule (TAVARES, 2011, p. V-112 - V-13). Em consequência desse aquecimento, a umidade relativa do ar de entrada nos secadores diminuiu.

4.7 – Análise psicrométrica do ar de secagem

Considerando-se a temperatura ambiente média de 25°C, no dia 07, umidade ambiente média de 85%, temperatura de saída média do condicionador de ar igual a 11°C e por fim a temperatura média de entrada do ar no secador de 17°C, pode-se realizar uma análise, no gráfico psicrométrico da Figura 29, das alterações de umidade relativa e de razão de mistura.

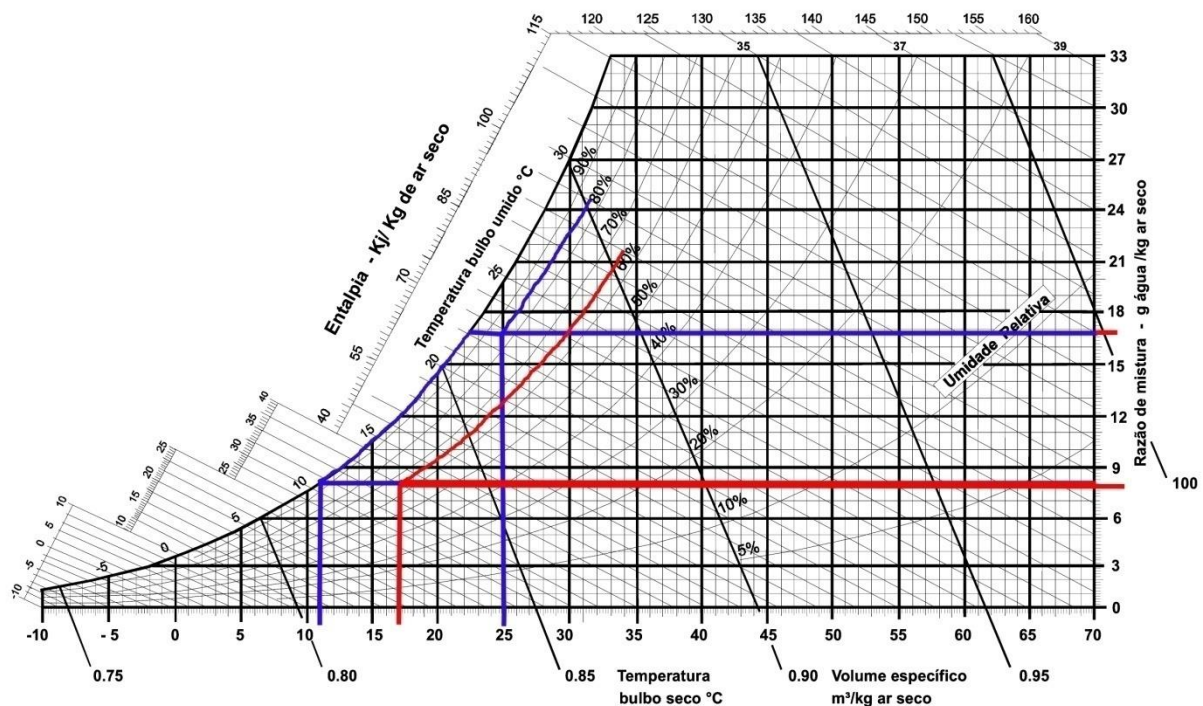


Figura 29 - Gráfico psicrométrico dos secadores com ar refrigerado do dia 07

Observa-se (Figura 29) que a razão inicial de mistura de vapor d'água no ar é de 17 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco e que após a redução de temperatura diminuiu para 8 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco. Com essa relação de mistura, após elevar a temperatura do ar de 11°C para 17°C, a umidade relativa diminuiu de 85% para 65%. O sistema de aquisição de dados registrou uma umidade média de entrada nos secadores de 62,1%. Considerando a imprecisão de leitura do gráfico psicrométrico pode ser considerado como precisa a relação encontrada no gráfico e a registrada pelo sistema de aquisição de dados.

Na repetição realizada no dia 28, os valores médios registrados foram 74,5% de umidade relativa no ambiente, 21,5°C na temperatura ambiente, 8°C de temperatura na saída do condicionador de ar e 16°C de temperatura na entrada dos

secadores. Refazendo o gráfico psicrométrico com esses valores, podem ser observados os resultados na Figura 30.

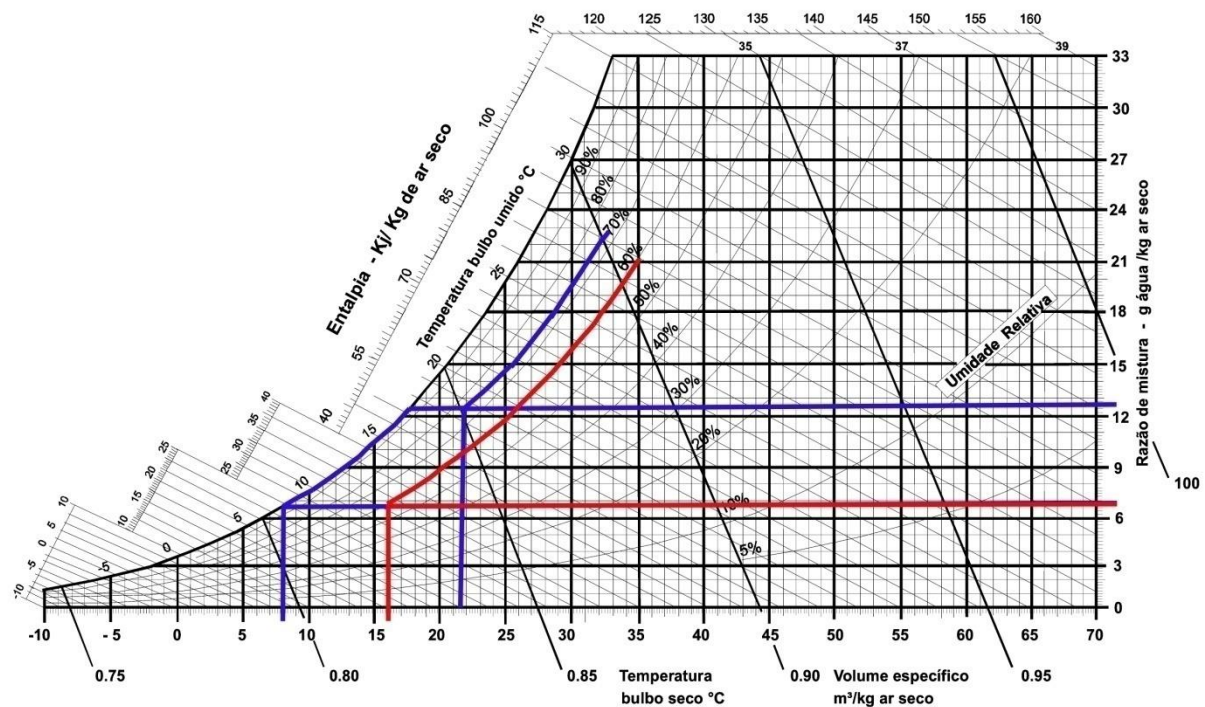


Figura 30 - Gráfico psicrométrico dos secadores com ar refrigerado do dia 28

Observa-se que o ar atmosférico apresentou uma razão de mistura inicial de 13 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, que após o resfriamento diminuiu para 7 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco (Figura 30). A umidade inicial que era de 74,5% foi reduzida para 60% após o reaquecimento do ar de 8°C para 16°C. O sistema de aquisição de dados registrou uma umidade média de entrada nos secadores tratados com ar refrigerado de 61,3%, indicando que o sistema de aquisição foi muito preciso.

No caso dos secadores tratados com ar ambiente, no dia 07, registraram-se as médias de 24,7°C de temperatura ambiente, umidade relativa de 85% e 31,5°C de temperatura de entrada do ar nos secadores. Aplicando-se esses valores no gráfico psicrométrico observou-se o comportamento apresentado na Figura 31.

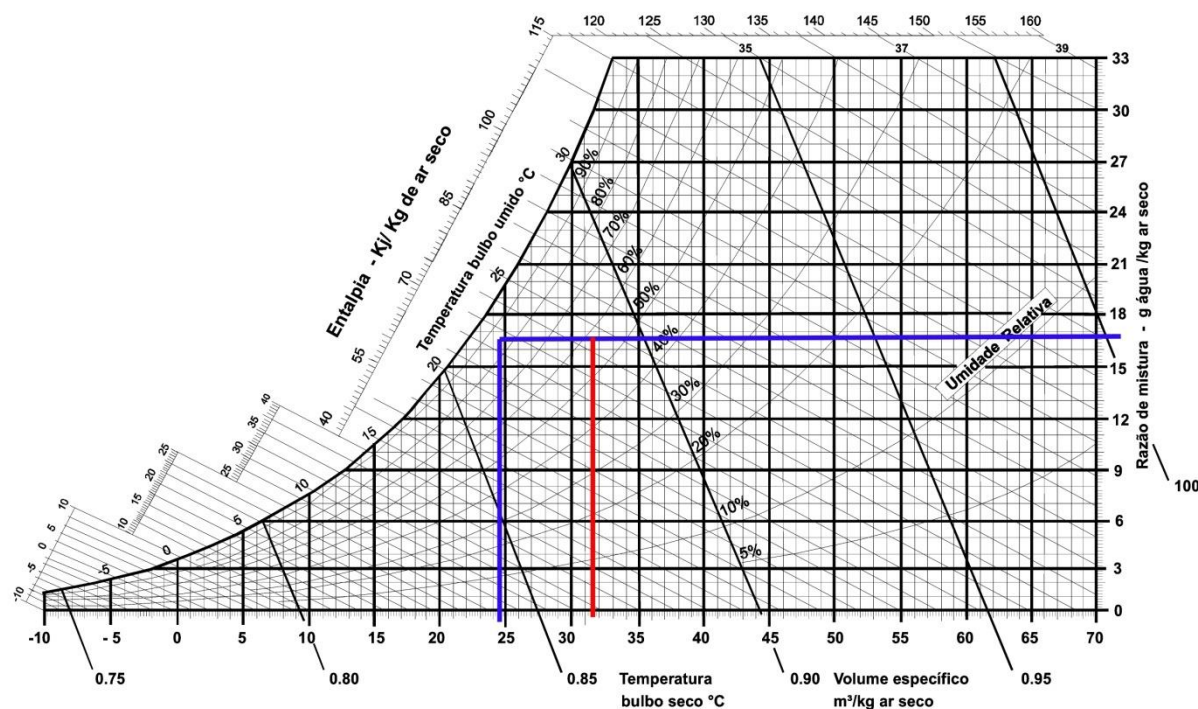


Figura 31 - Gráfico psicrométrico dos secadores com ar ambiente do dia 07

Neste caso (Figura 31) a razão de mistura de vapor d'água no ar é constante de 17 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, no entanto como a ar foi aquecido, no processo de compressão, de 24,7°C para 31,5°C, a umidade relativa sofreu uma redução de 85% para aproximadamente 57%. A umidade relativa média de entrada registrada nos secadores tratados com ar ambiente no dia 07 foi de 46,7%. O erro entre o resultado obtido pelo gráfico e o resultado obtido pelo sistema de aquisição não apresenta explicação plausível, podendo ter sido erro de leitura ou de registro dos termômetros de bulbo úmido e bulbo seco que foi realizado manualmente.

No dia 28, os valores médios registrados para os secadores tratados com ar ambiente foram de 74,5% de umidade relativa do ar ambiente, 21,5°C de temperatura ambiente e 29,7°C de temperatura de entrada do ar nos secadores. A análise psicrométrica é apresentada na Figura 32.

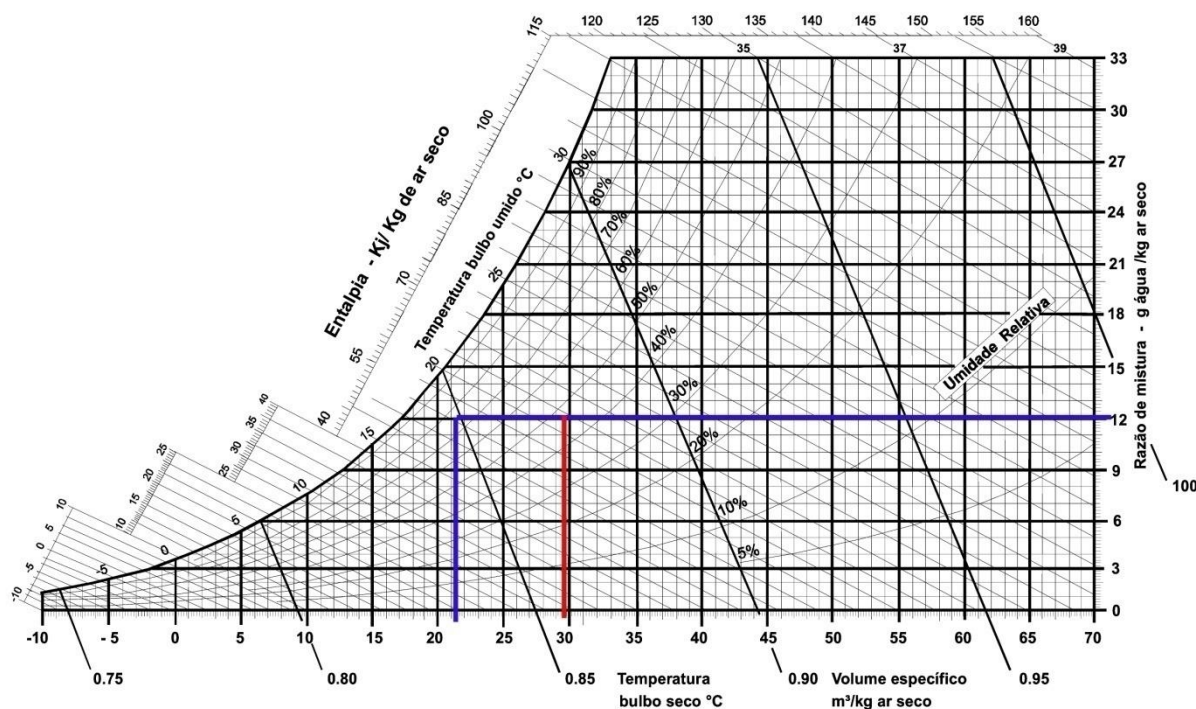


Figura 32 - Gráfico psicrométrico dos secadores com ar ambiente do dia 28

Observa-se que a razão de mistura constante foi de 12 gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, apresentando uma umidade relativa inicial de 74,5% que foi reduzida para aproximadamente 46%, após um acréscimo médio de temperatura de 8,2°C (Figura 32). No sistema de aquisição de dados foi registrada uma umidade média do ar de entrada de 41,4%, podendo-se considerar como sendo correta a leitura em virtude da, já citada, imprecisão de leitura do gráfico psicrométrico.

Em todos os casos, a redução da umidade relativa do ar sem uso de fonte extra de calor mostrou-se viável e, conseqüentemente, a secagem do produto tanto nos secadores tratados com ar refrigerado como nos secadores tratados com ar ambiente.

4.8 – Análise gráfica da temperatura do produto durante o processo

Com base nas análises do medidor de umidade capacitivo, que também fornece a temperatura do produto, elaboraram-se as Figuras 33 a 40.

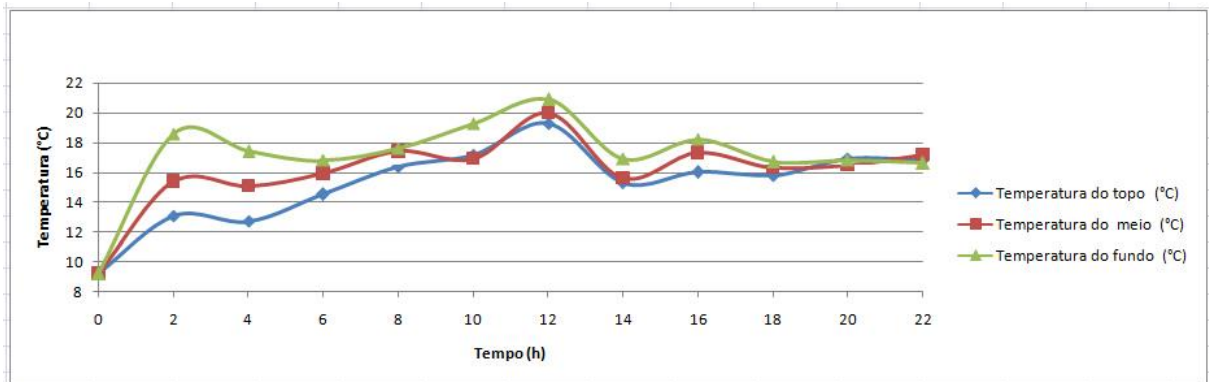


Figura 33 - Temperaturas do produto - secador refrigerado A - 07/04

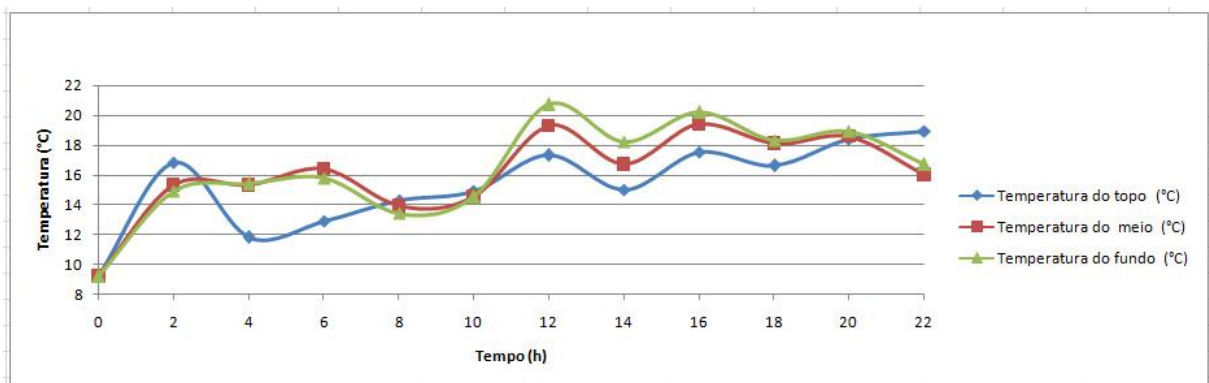


Figura 34 - Temperaturas do produto- secador refrigerado B - 07/04

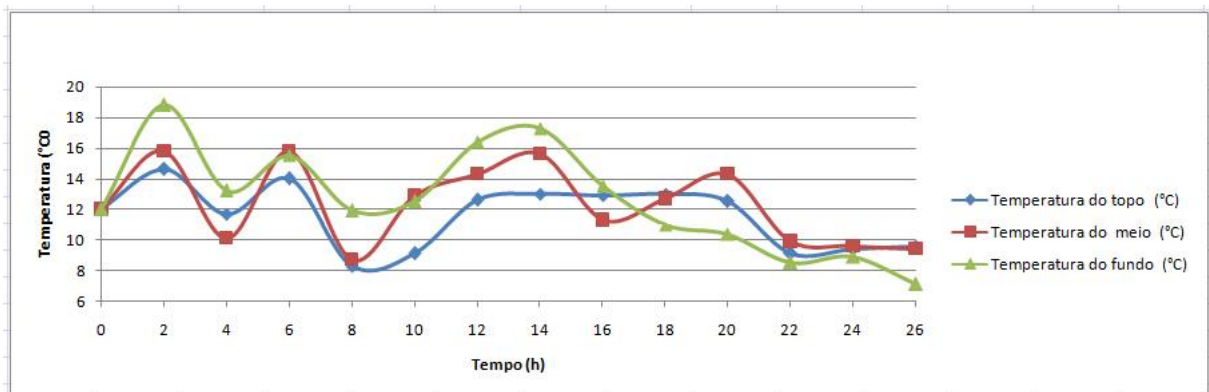


Figura 35 - Temperaturas do produto- secador refrigerado A - 28/04

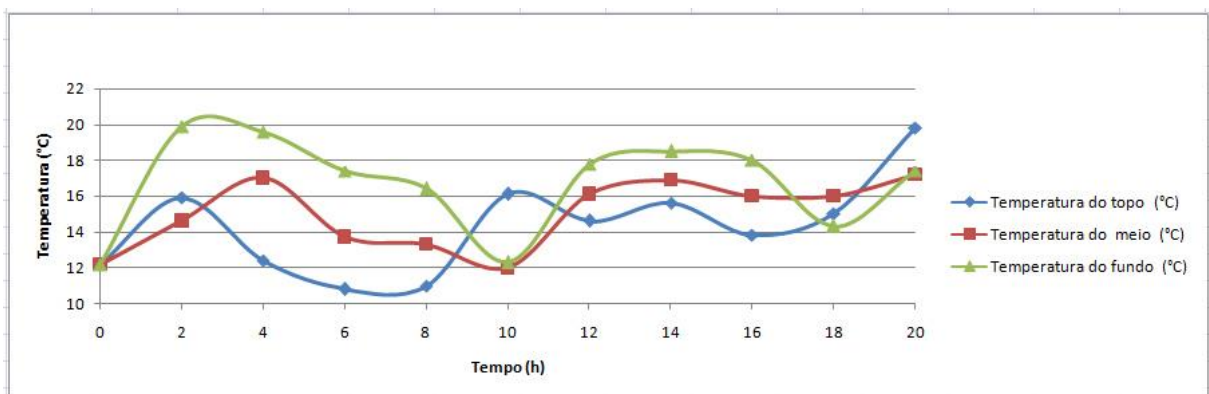


Figura 36 - Temperaturas do produto- secador refrigerado C - 28/04

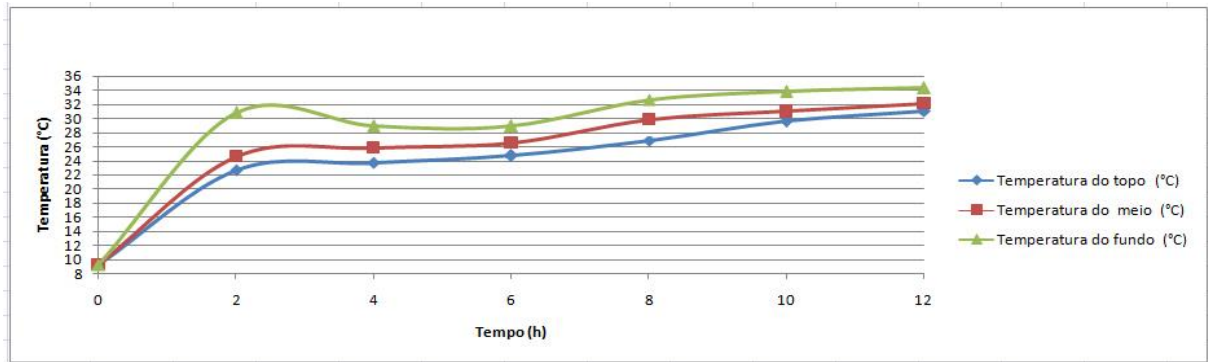


Figura 37 - Temperaturas do produto- secador com ar ambiente C - 07/04

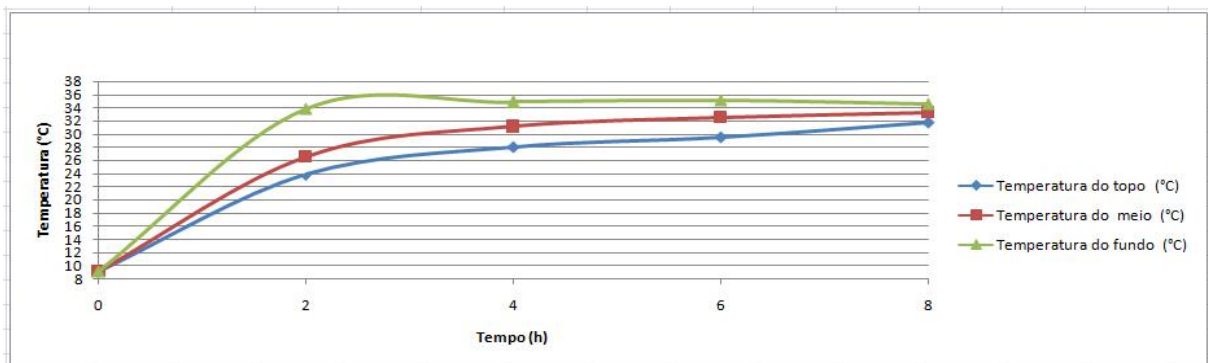


Figura 38 - Temperaturas do produto- secador com ar ambiente D - 07/04

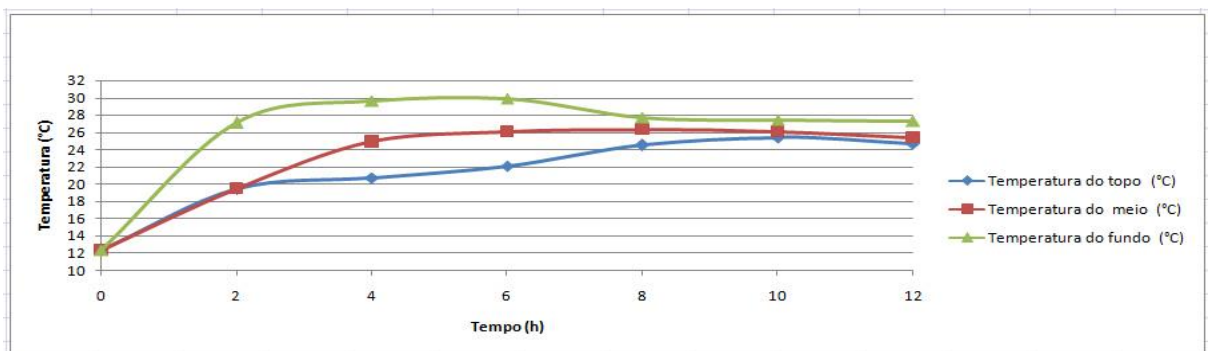


Figura 39 - Temperaturas do produto- secador com ar ambiente B - 28/04

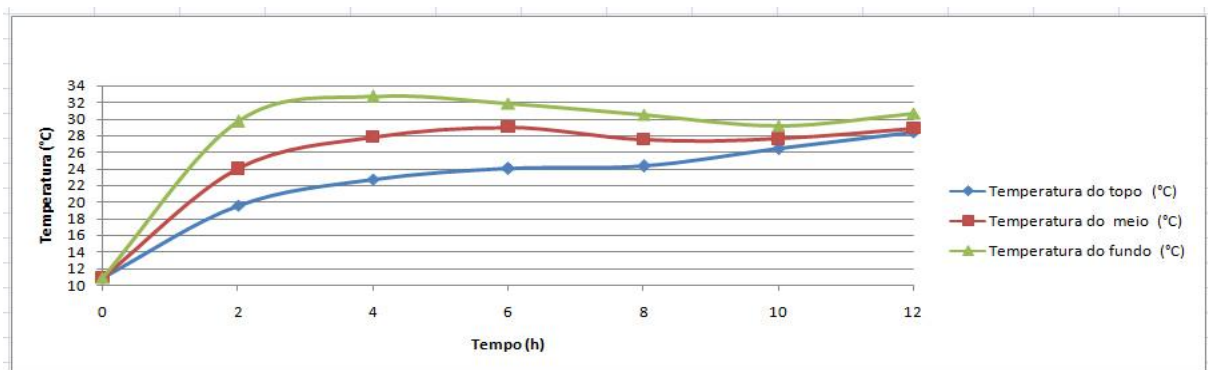


Figura 40 - Temperaturas do produto- secador com ar ambiente D - 28/04

Observa-se que a temperatura do produto nos secadores tratados com ar refrigerado não ultrapassou 22°C, ficando com médias de 16,4°C, 16,2°C e 16,0°C no fundo, no meio e no topo, respectivamente, no dia 07 e 13,9°C, 13,9°C e 13,8°C, no dia 28, enquanto que nos secadores tratados com ar ambiente a temperatura permaneceu mais alta, chegando, em alguns momentos, a ultrapassar 35°C, com médias no dia 07 de 28,7°, 27,0°C e 25,5°C no fundo, no meio e no topo, respectivamente, e de 25,6°C, 24,7°C e 23,9°C no dia 28, com uma diferença em torno de 10°C entre as médias dos secadores tratados com ar refrigerado e dos secadores tratados com ar ambiente. Isso traz um benefício imediato, conforme Lazzari e Lazzari (2014, p.1), que destacam a necessidade de resfriar as sementes imediatamente após a colheita para evitar infecção por fungos. Além disso, a temperatura de secagem abaixo de 20°C contribui para dificultar o desenvolvimento de insetos, segundo Fields (1992, p. 26).

4.9 – Resultados das análises de laboratório

Nas análises de laboratório, utilizando método de estufa a 105±3°C/24horas (BRASIL, 2009, p. 308-318), a umidade inicial foi de 29% nos dois dias e, com as amostras retiradas no final da secagem, obtiveram-se os resultados da Tabela 6.

Tabela 6 - Umidades das amostras finais do produto - Método de estufa a 105°C/24 horas

Posição de amostragem no silo	Secadores refrigerados				Secadores com ar ambiente			
	Dia 07/04		dia 28/04		Dia 07/04		dia 28/04	
	Silo A	Silo B	Silo A	Silo C	Silo C	Silo D	Silo B	Silo D
Fundo	15,3	15,6	17,4	16,2	13,7	13,1	14,4	13,2
Meio	15,6	15,3	18,1	17,4	14,9	15,9	16,7	16,6
Topo	15,9	15,8	18	18,1	14,7	14,8	15,9	15,8
Média	15,6	15,6	17,8	17,2	14,4	14,6	15,7	15,2

A média das umidades nas três alturas de amostras e nas quatro repetições da secagem com ar refrigerado acusou 16,6% e da secagem com ar ambiente 15%. A diferença entre os resultados do laboratório e das amostragens durante a secagem pode ser decorrente de imprecisão no equipamento de medição de umidade pelo método capacitivo. A umidade inicial registrada no medidor de umidade capacitivo foi de 22% enquanto que na análise de laboratório, utilizando método de estufa a 105±3°C/24horas (BRASIL, 2009, p. 308-318) o valor de

umidade do produto encontrado foi de 29%. Essa diferença, provavelmente, foi a causa do elevado tempo de secagem, principalmente nos secadores refrigerados.

Considerando as médias dos resultados de laboratório com o método de estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}/24\text{horas}$, por serem mais precisas, com umidade inicial de 29%, média de umidade após a secagem de 16,95% e tempo médio de secagem de 21 horas determinou-se a velocidade de secagem ($V_{s_{ref}}$) nos secadores refrigerados:

$$V_{s_{ref}} = \frac{29\% - 16,95\%}{21h} = 0,57\%.h^{-1}$$

Nos secadores com ar ambiente o tempo médio de secagem foi de 10 horas e a umidade média final, obtida com teste de estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}/24\text{horas}$, foi de 15,3%. Nessas condições obteve-se a velocidade média de secagem ($V_{s_{amb}}$) nos secadores com ar ambiente:

$$V_{s_{amb}} = \frac{29\% - 15,3\%}{10h} = 1,37\%.h^{-1}$$

Tanto os resultados de umidade do medidor capacitivo quanto os resultados das análises de laboratório foram submetidos à análise estatística, utilizando o *software* Sasm-Agri (CANTERI et al., 2001) obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 7 a 10.

4.10 – Análise de variância

Tabela 7 – Análise de variância dos dados do medidor de umidade capacitivo

Nº de tratamentos	2						
Nº de repetições	4						
Delineamento	Inteiramente Casualizado						
Tratamento	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Média		
Secagem com ar refrigerado	13,6	14	14,2	13,7	13,88		
Secagem com ar ambiente	12,1	12,3	12,5	12,3	12,3		
Causa da variação	G.L	S.Q.	Q.M.	F	F(5%)	F (1%)	
Tratamentos	1	4,96125	4,96125	96,804878	5,988	13,746	Significativo (1%)
Resíduo	6	0,3075	0,05125				
Total	7	5,26875					
C.V.	1,73%						

Tabela 8 - Teste de Tukey dos dados do medidor de umidade capacitivo

Número de tratamentos	2		
Quadrado médio do resíduos	0,05125		
Graus de liberdade do resíduo	6		
Número de repetições	4		
Grau de significância	5%		
Tratamento	Média	Repetições	Tukey
Secagem com ar refrigerado	13,875	4	a
Secagem com ar ambiente	12,3	4	b
C.V.	1,73%		

Tabela 9 - Análise de variância dos resultados da análise em laboratório - método de estufa a 105°C/24 horas

Nº de tratamentos	2						
Nº de repetições	4						
Delineamento	Inteiramente Casualizado						
Tratamento	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Média		
Secagem com ar refrigerado	15,6	15,6	17,8	17,2	16,55		
Secagem com ar ambiente	14,4	14,6	15,7	15,2	14,975		
Causa da variação	G.L	S.Q.	Q.M.	F	F(5%)	F (1%)	
Tratamentos	1	4,96125	4,96125	6,153488372	5,987522	13,74553	Significativo (5%)
Resíduo	6	4,8375	0,80625				
Total	7	9,79875					
C.V.	5,7%						

Tabela 6 - Teste de Tukey - método de estufa a 105°C/24 horas

Número de tratamentos	2		
Quadrado médio do resíduos	0,80625		
Graus de liberdade do resíduo	6		
Número de repetições	4		
Grau de significância	5%		
Tratamento	Média	Repetições	Tukey
Secagem com ar refrigerado	16,55	4	a
Secagem com ar ambiente	14,975	4	b
C.V.	5,7%		

Nos dois casos, a análise de variância e o teste de Tukey demonstraram que, embora os dois métodos usados sejam eficientes na secagem do produto, diferiram em eficácia. O tratamento usado como testemunha, somente com ar ambiente, foi mais eficaz por reduzir a umidade em menor tempo e a valores mais baixos.

O processo de secagem, com ar refrigerado, foi interrompido antes que o produto entrasse em equilíbrio higroscópico na última camada de análise em função de problemas de ordem técnica, equilíbrio que, provavelmente, seria atingido com o prolongamento do tempo de secagem.

4.11 – Equilíbrio higroscópico do arroz x características do ar de secagem

Segundo os dados do sistema de secagem, as médias de umidade relativa de entrada dos secadores de secagem com ar refrigerado e com ar ambiente, respectivamente, foram 61,7% e 43,8% e as médias de temperatura do ar de 15,4°C e 27,7°C. Analisando-se esses valores na Figura 41 de equilíbrio higroscópico do arroz, verifica-se que com as condições do ar de secagem refrigerado poderia ser atingida uma umidade em torno de 13,6% no produto e com as condições do ar ambiente poderia ser atingida uma umidade de em torno de 10% no produto.

Tabela de Umidade de Equilíbrio Higroscópico (% b.u.)														
Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa do Ar (% U.R.)													
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
15	8,3	9,1	9,9	10,7	11,4	12,1	12,8	13,6	14,3	15,2	16,0	17,0	18,1	
17	8,2	9,0	9,8	10,5	11,2	11,9	12,7	13,4	14,2	15,0	15,8	16,8	17,9	
19	8,1	8,9	9,7	10,4	11,1	11,8	12,5	13,2	14,0	14,8	15,7	16,6	17,7	
21	8,0	8,8	9,5	10,3	11,0	11,7	12,4	13,1	13,8	14,6	15,5	16,4	17,5	
23	7,9	8,7	9,4	10,1	10,8	11,5	12,2	12,9	13,7	14,5	15,3	16,2	17,3	
25	7,8	8,6	9,3	10,0	10,7	11,4	12,1	12,8	13,5	14,3	15,1	16,1	17,1	
27	7,7	8,5	9,2	9,9	10,6	11,3	12,0	12,7	13,4	14,2	15,0	15,9	17,0	
29	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	14,8	15,7	16,8	
31	7,6	8,3	9,0	9,7	10,4	11,0	11,7	12,4	13,1	13,9	14,7	15,6	16,6	
33	7,5	8,2	8,9	9,6	10,3	10,9	11,6	12,3	13,0	13,7	14,5	15,4	16,5	
35	7,4	8,1	8,8	9,5	10,2	10,8	11,5	12,2	12,9	13,6	14,4	15,3	16,3	
37	7,3	8,1	8,7	9,4	10,1	10,7	11,4	12,0	12,7	13,5	14,3	15,1	16,2	
39	7,3	8,0	8,7	9,3	10,0	10,6	11,3	11,9	12,6	13,3	14,1	15,0	16,0	

Figura 41 - Tabela de equilíbrio higroscópico do arroz

Fonte: CIA ULTRAGAZ, 2013

Observa-se também que a média de tempo de secagem nos secadores tratados com ar refrigerado foi em torno de 21 horas e nos secadores tratados com ar ambiente em torno de 10 horas. Isso, provavelmente, foi causado pela maior temperatura e menor umidade relativa do ar de secagem dos secadores com ar ambiente, pois embora a quantidade de gramas de vapor d'água por quilograma de ar seco, do ar de secagem dos secadores refrigerados seja menor, devido à menor temperatura, a umidade relativa é maior, além da menor quantidade de energia por quilograma de ar seco, como pode ser verificado no gráfico psicrométrico da Figura 42. Percebe-se que o ar desumidificado por resfriamento apresenta uma temperatura média de 15,4°C, 61% de média de umidade relativa, contém 7,7 gramas de vapor de água por quilograma de ar seco e uma energia total em torno de 9,5 quilocalorias por quilograma de ar seco, enquanto o ar de secagem ambiente

apresentou uma temperatura média de $27,7^{\circ}\text{C}$, 43,8% de umidade relativa média, contém 11,2 gramas de vapor de água por quilograma de ar seco e uma energia total em torno de 23,3 quilocalorias por quilograma de ar seco. Como o processo de secagem envolve trocas térmicas, a maior energia armazenada por quilograma de ar, nos secadores com ar ambiente deve, também, ser responsável pelo menor tempo de secagem.

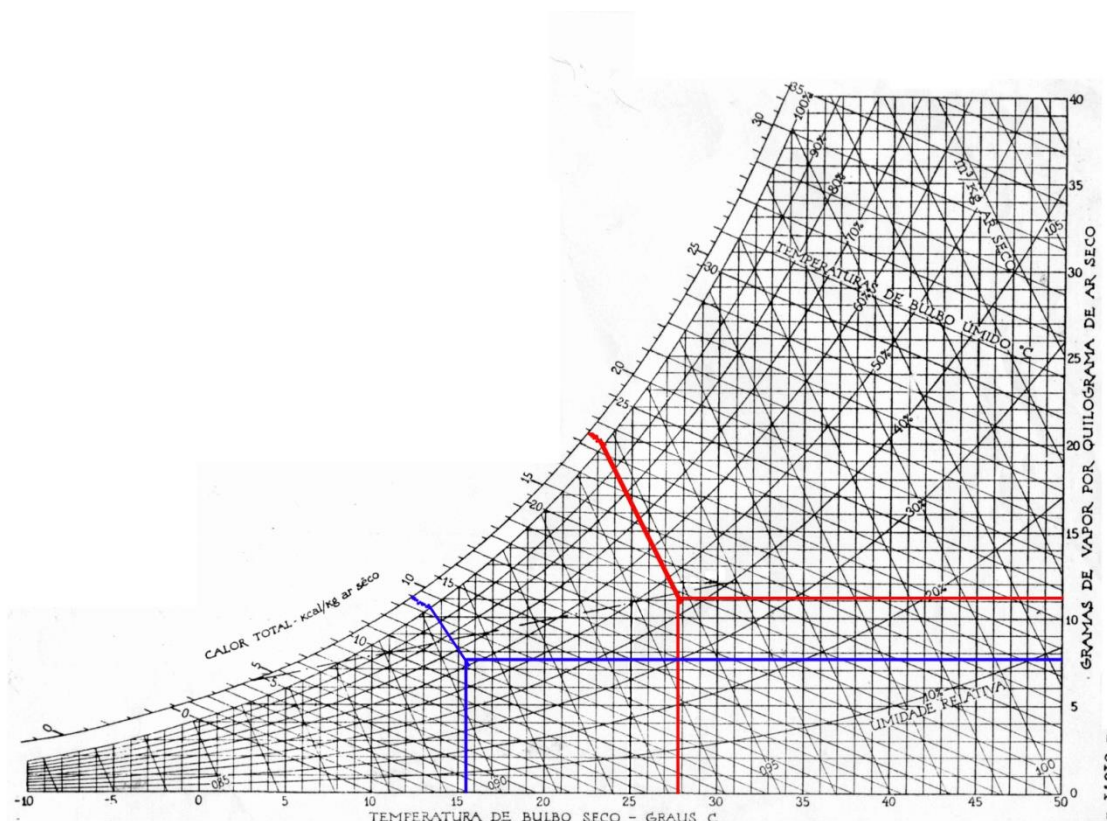


Figura 42- Gráfico psicrométrico das médias de temperaturas e umidades do ar de secagem dos secadores tratados com ar refrigerado e tratados com ar ambiente

4.12 – Considerações finais

Segundo Silva et al. (1999, p. 731), a média anual de umidade relativa em Pelotas, entre os anos de 1961 e 1998 girou em torno de 80,4% e a temperatura média anual em torno de $17,6^{\circ}\text{C}$ (PELOTAS, 2014). No dia 28/04 a temperatura média de saída do condicionador de ar foi de 8°C , a temperatura ambiente média foi de $24,7^{\circ}\text{C}$. Se for utilizado um sistema de condicionamento de ar com maior potência, permitindo baixar a temperatura de saída do ar para uma média de 5°C , é possível, utilizando-se uma fonte de calor, elevar a temperatura para 17°C ,

considerando as médias anuais de temperatura e umidade relativa da cidade de Pelotas-RS, e obter uma umidade relativa, no ar de secagem, em torno de 40%, conforme mostrado na Figura 43.

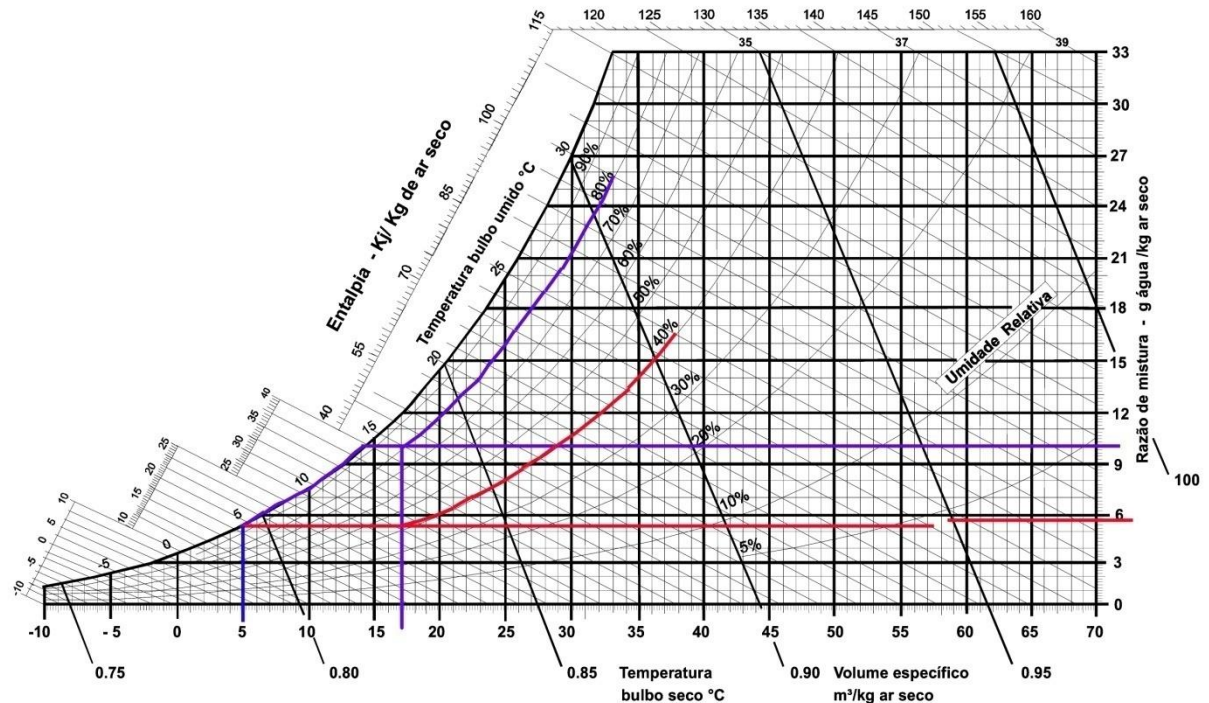


Figura 43 - Proposta de otimização do sistema com leve acréscimo de temperatura

Essa pequena alteração, provavelmente, reduziria o tempo de secagem com ar refrigerado, em relação ao experimento, e ainda assim estaria dentro de uma faixa de temperatura abaixo de 20°C que, segundo Fields (1992, p. 26), dificulta o desenvolvimento de insetos.

5 – CONCLUSÃO

O experimento mostrou que é possível secar produtos com temperaturas abaixo de 20°C, utilizando um sistema de desumidificação por resfriamento do ar, sem necessidade de reaquecimento forçado, e atingindo uma velocidade média de secagem de 0,57 pontos percentuais por hora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

BAUDET, Leopoldo M.L. **Armazenamento de Sementes de Arroz** In: PESKE, S.T., NEDEL, J.L., BARROS, A.C.S.A. Produção de Arroz Pelotas, Editora Universitária - UFPEL, 1996, 655p.

BOYD, A.H.; MATTHES, R.K.; WELCH, G.B. **Heated air drying of soybean seed**. Seed Technology Laboratory, Mississippi State University, Mississippi 1974. 17p. (ASAE Paper, 74-3001).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília : Mapa/ACS, 2009. 399 p.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., and Hall, C.W. **Drying Cereal Grains**.1974. AVI Publishing Co., West Port, CT. U.S.A

CANTERI, M.G., ALTHAUS, R.A., VIRGENS FILHO, J.S., GIGLIOTI, E.A., GODOY, C.V. SASM - Agri: **Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan**. Revista Brasileira de Agrocomputação, V.1, N.2, p.18-24. 2001

CAVARIANI, Cláudio; SILVA, Walter Rodrigues da; MIRANDA, Luís Carlos; NAKAGAWA, João; BELGIORNO, Daniella Côrtes. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. II. Andamento físico. Revista Brasileira de Sementes, vol. 21, nº 1, p.7-17 – 1999. Disponível em: <http://www.abrates.org.br/revista/artigos/1999/v21n1/artigo02.pdf> Acesso em: 15/06/2014.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP, São Paulo.

CIA ULTRAGAZ. **Sistema de secagem a Baixas temperaturas**. Prêmio GLP de Inovação e Tecnologia – 2013. Disponível em: <http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/wp-content/uploads/Sistema-de-secagem-a-baixas-temperaturas.pdf> acesso em: 06/05/2014.

FIELDS, Paul G. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures. In: **J. stored Prod. Res.** Vol.28,Nº. 2,p. 89-118, 1992. Disponível em: <http://bru.gmpcr.ksu.edu/proj/iwcspp/pdf2/9/kps71.pdf> Acesso em: 20/07/2014.

GARCIA, Danton Camacho; BARROS, Antônio Carlos Souza Albuquerque; PESKE, Silmar Teichert; MENEZES, Nilson Lemos de. A secagem de sementes. In: **A secagem Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, nº 2, p.603-608, mar - abr, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v34n2/a45v34n2.pdf> Acesso em: 23/07/2014.

HALLIDAY, David; RESNIK, Robert, WALKER, Jearl. Temperatura, calor e a

primeira lei da termodinâmica. In: **Fundamentos da física** vol. 2. 8ª ed. rio de janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009, p. 183-207.

LAZZARI, Flavio Antonio; LAZZARI, Sonia Maria Noemberg. **Resfriamento artificial no controle de insetos em sementes armazenadas**. (2014). Disponível em: <www.coolseed.com.br/pt/download/category/9-documentos.html?download=38%3Aresfriamento-artificial-de-sementes-controle-de-insetos> Acesso em: 10/07/2014.

LEVIEN, Alexandre Moscarelli. **Secagem estacionária de sementes de soja utilizando ar de secagem com variações na umidade relativa**. 2005. 41p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes), Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade federal de Pelotas, Pelotas.

LUZ, Maria Laura Gomes Silva; LUZ, Carlos Alberto Silveira da. **Determinação de umidade de grãos e sementes**. Pelotas: Editora Universitária/UFPel, 2008. 111p.

PARK, Kil Jin; ANTONIO, Graziella Colato; OLIVEIRA, Rafael Augustus de. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf> Acesso em: 23/07/2014.

PASQUALLI, Leandro Lourenço. **Qualidade de sementes de arroz irrigado submetidas a diferentes temperaturas na secagem estacionária**. 2005. 49p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

PELOTAS, Prefeitura Municipal de Pelotas. **Dados físicos e econômicos**. Disponível em: <http://www.pelotas.com.br/cidade/dados/pelotas_dados.htm> Acesso em: 27/07/2014.

PESKE, Silmar Teichert; BARROS, Antonio Carlos Albuquerque; SCHUCH, Luís Osmar. Produção de sementes. In: **Sementes: Fundamentos Científicos e tecnológicos**. 3.ed. Pelotas: Editora Universitária / UFPel, 2012. p. 14–100.

PESKE, Silmar Teichert; BAUDET, Leopoldo M. L. Secagem de sementes em secadores comerciais. In: **Curso sobre beneficiamento de sementes para encarregados de U.B.S.** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1984.

PESKE, Silmar Teichert; VILLELA, Francisco Amaral. Secagem de sementes. In: **Sementes: Fundamentos Científicos e tecnológicos**. 3.ed. Pelotas: Editora Universitária / UFPel, 2012. p. 371-421.

POLA, J. N. **Efeito do retardamento de colheita sobre a germinação, vigor e sanidade de sementes de soja**. 1979. 144p. (Dissertação de mestrado) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

RANGEL, Marco Antônio Sedrez; ZIMMER, Gilberto Jaime; VILLELA, Francisco Amaral. **Secagem estacionária de sementes de arroz com ar ambiente**. Pesq. Agropec. Bras. Brasília, v.32, n.10, p.1081-1090, 1997. Disponível em: <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4754/7290> Acesso em: 30/03/2012.

REDU, R. N.; KRÜGER, D.S.; SARMENTO, A.P.; LUZ, C.A.S.; LUZ, M. L.G. S.; VILLELA, F.A. Determinação da curva de secagem de arroz em câmara fria. In: **Congresso de Iniciação Científica**, 2006, Pelotas. **Anais...** Pelotas, UFPel, 5 a 7 dez. 2006, 4p.

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. 1980. 295p. (Publicação ACIESP, 22).

SARAVIA, Cristine Thomaz; PERES, Wolmer Brod; RISSO, Joel. **Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado**. Revista Brasileira de Sementes, v.29, n.2, p. 23-27, 2007.

SILVA, Clarissa Santos da. **Qualidade fisiológica e sanitária de sementes de arroz com diferentes graus de umidade, tratadas com fungicida**. 2007. 49p. (Dissertação de mestrado) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SILVA, João Baptista da; PEREIRA, Rodrigo da Silva; ÁVILA, Ana Paula Rios de; ROSA, Gisele Cardoso da. **Uma análise estatística da umidade relativa em Pelotas, Rio Grande do Sul**. 1999. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-7fda239def0e82560c67b4ed066a0798.pdf> Acesso em: 27/07/2014

TAVARES, Alvacir Alves. **Eletricidade, magnetismo e consequências**. Editora e Gráfica Universitária – UFPel, Pelotas, 2011. 296p.

VILLELA, Francisco Amaral; SILVA, Walter Rodrigues da. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. Anais ESALQ, Piracicaba, 48: 185-209, 1991. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aesalq/v48/11.pdf> Acesso em: 20/07/2014.